

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Trakční napájecí soustavy

studijní opora

doc. Ing. Radovan Doleček, Ph.D.
Ing. Ondřej Černý, Ph.D.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Pardubice 2015

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Trakční napájecí soustavy

studijní opora

doc. Ing. Radovan Doleček, Ph.D.

Ing. Ondřej Černý, Ph.D.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Tento materiál je spolufinancovaný z Evropského sociálního fondu a státního rozpočtu České republiky.

Registrační číslo projektu: CZ.1.07/2.2.00/28.0272.

Tato publikace neprošla jazykovou korekturou.

ISBN 978-80-7395-879-4 (tisk)

ISBN 978-80-7395-880-0 (pdf)

ISBN 978-80-7395-881-7 (CD)

Recenzenti: doc. Ing. Karel Hlava, CSc. Ing. Vladivoj Výkruta, CSc.

© doc. Ing. Radovan Doleček, Ph.D., Ing. Ondřej Černý, Ph.D., 2015



ELEKTRIZACE ŽELEZNIC PRAHA A.S.
DODAVATEL TRAKČNÍHO VEDENÍ
A ELEKTROTECHNOLOGICKÝCH CELKŮ



TRADICE

ZKUŠENOST

KVALITA

nám. Hrdinů 1693/4a
140 00 Praha 4
Tel: 296 500 111
E-mail: info@elzel.cz

www.elzel.cz



Poděkování

Poděkování patří doc. Ing. Karlu Hlavovi, CSc. a Ing. Vladivoji Výkrutovi, CSc. za poskytnuté rady a doporučení při zpracovávání této studijní opory. V neposlední řadě patří poděkování Bc. Jiřímu Štosovi za pomoc při přípravě podkladových dokumentů.

Předmluva

Cílem této studijní opory je detailní seznámení se s dnes používanými trakčními napájecími (DC a AC) soustavami pro kolejová vozidla, jejich charakteristikou a využitím včetně příkladů a popisu základních technologických prvků používaných u jednotlivých systémů. Skutečnost, že se elektrická trakce dlouhodobě jeví jako jedna z neekonomičtějších (především s rostoucím objemem přepravovaného zboží a vzdáleností dopravy) a ekologicky nejšetrnějších způsobů dopravy (doprava v městských aglomeracích), vede k požadavkům na její další rozvoj a rozšíření v budoucnu. Toto je patrné i ze Střednědobého plánu rozvoje dopravní infrastruktury s dlouhodobým výhledem (Dopravní sektorová strategie 2. Fáze z 31.8.2013, Kniha 5 - Principy a cíle Dopravních strategií.), kde jsou, mimo jiné, uvedena následující východiska týkající se oblasti železniční dopravy v rámci EU:

- Do roku 2030 převedení 30 % silniční přepravy nákladu nad 300 km na jiné druhy dopravy, jako např. na železniční či vnitrozemskou vodní dopravu, a do roku 2050 dokonce více než 50 %.
- Dokončení hlavní sítě TEN-T do roku 2030 a globální sítě do roku 2050.
- Dokončení evropské vysokorychlostní železniční sítě do roku 2050.
- Většina objemu přepravy cestujících na střední vzdálenost by do roku 2050 měla probíhat po železnici.
- Do roku 2050 propojení všech letišť na hlavní síti na železniční síť.

Současně s tím by mělo dojít k většímu využití železniční dopravy na elektrizovaných tratích pro příměstskou, aglomerační i městskou dopravu. Všechny tyto aspekty kladou velký důraz na interoperabilitu na všech úrovních železniční dopravy, tedy i v oblasti napájení. V současné době je problematika různých napájecích systémů v národním i nadnárodním měřítku řešena používáním moderních vícesystémových vozidel, která umožňují přechod mezi jednotlivými systémy bez přerušení provozu.

OBSAH

Úvod	13
1 Soustava DC 600 V a DC 750 V	14
1.1 Charakteristika soustavy	14
1.1.1 Základní součásti napájecí soustavy	14
1.2 Schéma soustavy	17
1.2.1 Diodová měnička pro napájení tramvajové sítě	17
1.2.2 Tyristorová měnička pro napájení tramvajové sítě	18
1.2.3 Měnička pro napájení sítě metra	20
1.3 Trakční transformátory	20
1.4 Měniče	21
1.4.1 Nevýsuvné měniče	22
1.4.2 Výsuvné provedení měniče	22
1.5 Rozváděče měníren	22
1.6 Odpojovače, odpínače a výkonové vypínače	24
1.6.1 Odpojovače	24
1.6.2 Odpínače	25
1.6.3 Výkonové vypínače	25
1.6.4 Rychlovypínače	26
1.7 Ochrany	27
1.7.1 Ochrany v části vn - vstupní pole měničky 22 kV	27
1.7.2 Ochrany transformátoru 22/0,52 kV (22/0,65 kV)	27
1.7.3 Ochrany usměrňovače	28
1.7.4 Ochrany rozvaděče	28
1.7.5 Ochrany vývodových polí (napáječů)	28
1.7.6 Ochranné prvky v trakčním vedení:	29
1.8 Nové trendy v napájecí soustavě DC 750 V	30
2 Soustava DC 1,5 kV	32
2.1 Charakteristika soustavy a využití	32
2.2 Schéma soustavy	33
2.3 Trakční transformátory	33
2.4 Měniče	33
2.5 Rozváděče měníren	35
2.6 Odpojovače, odpínače a výkonové vypínače	35
2.6.1 Odpojovače	36
2.6.2 Rychlovypínače	36
2.7 Ochrany	37
3 Soustava DC 3 kV	38

3.1	Charakteristika soustavy a využití.....	38
3.2	Schéma soustavy	40
3.2.1	Trakční měniřna.....	40
3.2.2	Spínací stanice	40
3.3	Transformátory.....	43
3.4	Měniče.....	44
3.4.1	Rámové diodové měniče.....	44
3.4.2	Skříňové diodové měniče	44
3.5	Rozváděče měřiren	46
3.6	Odpojovače, odpínače a výkonové vypínače	46
3.6.1	Odpojovače.....	47
3.6.2	Odpínače	47
3.6.3	Výkonové vypínače	47
3.6.4	Rychlo vypínače	48
3.7	Ochrany.....	48
3.7.1	Vzájemná vazba napáječových rychlo vypínačů	48
3.7.2	Poruchová hlášení od ochran a zabezpečení.....	48
4	Soustava AC 15 kV 16,7 Hz.....	50
4.1	Charakteristika soustavy a využití.....	50
4.2	Schéma soustavy	51
4.3	Trakční transformátory.....	51
4.4	Měniče.....	52
4.4.1	Rotační měniče	52
4.4.2	Statické měniče	52
4.5	Rozváděče transformoven	55
4.6	Odpojovače, odpínače a výkonové vypínače	55
4.7	Ochrany.....	55
5	Soustava AC 25 kV 50 Hz.....	56
5.1	Charakteristika soustavy a využití.....	56
5.1.1	Rekuperace	56
5.2	Schéma soustavy	57
5.2.1	Trakční transformovna	57
5.2.2	Spínací stanice	58
5.2.3	Filtračně-kompenzační zařízení.....	60
5.3	Trakční transformátory.....	61
5.3.1	Transformátory používané u ČD.....	61
5.4	Rozváděče transformoven	62
5.5	Odpojovače, odpínače a výkonové vypínače	63
5.5.1	Rozvodna 110 kV	63

5.5.2	Rozvodna 27 kV	63
5.6	Ochrany	64
5.6.1	Ochrany transformátorů	65
5.6.2	Doporučené ochrany ve vývodech	65
5.6.3	Typy ochran	65
6	Soustava 2AC 25 kV 50 Hz	66
6.1	Charakteristika soustavy a využití	66
6.2	Schéma soustavy	67
6.3	Trakční transformátory	69
6.3.1	Autotransformátory	70
6.4	Rozváděče transformoven	70
6.5	Odpojovače, odpínače a výkonové vypínače	70
6.6	Ochrany	70
7	Problematika vedení zpětného trakčního proudu	71
7.1	Základní pojmy	71
7.2	Odlišnosti DC a AC tratí	74
7.2.1	DC tratě	74
7.2.2	AC tratě	74
7.2.3	Mimodrážní elektrická zařízení	75
7.3	Tratě napájené AC soustavami	75
7.3.1	Ochrana osob	78
7.3.2	Ovlivňování ostatních zařízení	79
7.3.3	Konstrukce zařízení	80
7.3.4	Zpětné vedení	80
7.3.5	Zařízení tunelů	81
7.3.6	Viadukty	81
7.3.7	Cizí zařízení	82
7.3.8	Ochrana před atmosférickým přepětím	82
7.4	Tratě napájené DC soustavami	83
7.5	Výstavba vedení zpětného proudu a uzemnění	84
7.5.1	Bezpečnost osob	84
7.5.2	Ochrana před bludnými proudy	84
7.6	Aktivní a pasivní zpětný vodič	85
7.6.1	Rozdělení proudů	86
7.6.2	Redukční faktor	88
7.6.3	Napětí kolej – země	89
7.7	Současná řešení s použitím autotransformátorů	90
8	Podmínky připojení na distribuční síť	93

8.1	Podmínky připojení.....	93
8.1.1	Připojovací podmínky odběrných zařízení z trakčních proudových soustav DC 1,5 kV, DC 3 kV, AC 25 kV 50 Hz.....	93
8.2	Napětí a kmitočet trakčních soustav.....	93
8.2.1	Napětí.....	94
8.2.2	Kmitočet.....	94
8.3	Obecné základní předpisy.....	95
8.3.1	Základní požadavky na elektrické napájecí a spínací stanice.....	95
8.3.2	Rozhodující stroje, přístroje a zařízení.....	95
	Seznam zkratk	97
	Seznam obrázků	98
	Seznam tabulek	101
	Literatura	102

SEZNAM SYMBOLŮ A ZNAČEK



Cíle tématu



Klíčová slova tématu



Klíč k řešení úloh tématu



Otázky k zamyšlení danému tématu

ÚVOD

Počátky elektrických napájecích soustav v dopravě se objevují v 19. století. Nejprve se jednalo o nezávislou trakci, poháněnou galvanickými články umístěnými na vozidle. Ta se však ukázala jako neperspektivní. Významným posunem pro elektrizaci železnic bylo předvedení elektrického vlaku se závislou trakcí německým vynálezcem Wernerem von Siemensem na výstavě v Berlíně roku 1879. Tím byl odstartován rozvoj elektrické trakce, která s sebou přinesla výhody v podobě snížení hlučnosti a znečištění oproti tehdy užívaným parním vlakům. Napájecí soustava byla v té době DC a výroba elektřiny pro jednotlivé tratě byla zajištěna lokálními zdroji. AC napájecí soustavy se objevují až po roce 1892. První pokusy byly prováděny v Berlíně. K významným osobnostem v souvislosti s rozvojem AC trakční napájecí soustavy patřil maďarský inženýr Kálmán Kandó, hlavní konstruktér firmy Ganz v Budapešti, který zdokonalil třífázový motor a stavěl železnice se dvěma trolejemi a třetí fází přiváděly koleje. Jiné uspořádání potom představoval systém napájecí trolej jednofázovým proudem, u kterého však bylo vzhledem k tehdejším omezeným možnostem v oblasti usměřovačů nutno pro napájení DC komutátorových motorů snížit frekvenci. Tak byla v roce 1913 ustanovena hodnota AC trakčního napájecího napětí na 15 kV s frekvencí $16\frac{2}{3}$ Hz. Tato napájecí soustava se dodnes používá např. v Německu, Rakousku a skandinávských zemích. Elektrizace tratí v Čechách se ubírala směrem DC napájení, jejím průkopníkem byl inženýr František Křížík. První elektrická tramvajová trať byla postavena z Letné na Výstaviště v Praze roku 1891 a první elektrizovaná železniční trať mezi Tábořem a Bechyní v roce 1905. Vývoj DC napájecí soustavy se postupně ustálil na hodnotách napětí 600 V, 750 V a 1500 V. Tyto napájecí soustavy jsou prakticky využívány dodnes především pro napájení městských drah. Pro napájení železniční vlakové dopravy je soustava DC 1500 V rozšířena například ve Francii nebo v Nizozemsku.

Závislá elektrická trakce kromě již zmíněných výhod snížení hlučnosti a emisí přináší navíc v případě připojení na distribuční energetickou síť v podstatě neomezenou kapacitu zdroje dodávané energie z pohledu hnacího vozidla. Obecně potom platí, že výkon, který může daná soustava přenášet, je úměrný hodnotě napětí a nepřímo úměrný podélné impedanci vedení při zadané délce napájeného úseku. Tato skutečnost se zvyšujícími se požadavky na výkon elektrické trakce vedla ke snaze zvýšit hodnotu napájecího napětí. Z tohoto důvodu se u nás a v některých dalších evropských zemích rozšířila napájecí soustava DC 3 kV. Rozvoj polovodičové techniky a elektrotechniky, zvládnutí napájení napětím s průmyslovým kmitočtem 50 Hz a zároveň stále stoupající energetická náročnost vozidel vedla v některých zemích k zavedení další napájecí soustavy. Tím je napájecí soustava AC 25 kV 50 Hz. Používání různých napájecích soustav a požadavek na interoperabilitu však vede k nutnosti konstruování dvou a vícesystémových vozidel. Přebudování stávající infrastruktury na jednotnou soustavu by bylo příliš složité a nákladné.

1 SOUSTAVA DC 600 V A DC 750 V



Klíčová slova:

Charakteristika soustavy, schéma soustavy, trakční transformátor, měnič, rozváděč měnirny, odpojovač, odpínač, výkonový vypínač, ochrana.



Cíl studia:

Seznámení studenta s trakční napájecí soustavou DC 600 V a DC 700 V, jejich charakteristikou a využitím včetně příkladů a popisu základních technologických prvků používaných u těchto soustav.



1.1 Charakteristika soustavy

Napájecí soustava napěťové úrovně DC 600 V a 750 V je využívána především v městských aglomeracích pro tramvajové dráhy, příměstské vlaky a metro [1]. Napájecí soustava zahrnuje trakční měnirny (TM) připojené k distribuční síti (DS), v ČR obvykle na napěťové úrovni 22 kV, v nichž dochází k transformaci napětí na požadovanou hodnotu a k jeho usměrnění. Součástí TM je rozvodna zajišťující rozdělení usměrněného napětí na jednotlivé vývody pro napájení samostatných traťových úseků [2, 3]. Přívody k trakčnímu vedení [4] nebo k napájecí kolejnici jsou provedeny obvykle kabelem. U vedení pro tramvajový provoz je převážně kladný pól přiveden k troleji a záporný ke kolejnici. Pro napájení metra a příměstských drah (S-Bahn) se používá (třetí) napájecí kolej [5]. Je možné se setkat i s jinými způsoby napájení tramvajových jednotek (např. v centru Bordeaux), kde je využito netradičního spodního napájení z prostřední napájecí koleje. Podrobněji je tato soustava popsána v kapitole 1.8.

Výhody:

- jednoduchost regulace sériového trakčního motoru,
- nižší izolační hladina,
- bezpečnost s ohledem na hodnotu provozovaného napětí oproti jiným soustavám.

Nevýhody:

- vysoké proudové hodnoty a z toho vyplývající výkonová omezení moderních vozidel,
- v porovnání se soustavami AC složitější napájecí stanice,
- nutnost hustší sítě napájecích stanic s ohledem na úbytky napětí a proudovou zatížitelnost vedení.

1.1.1 Základní součásti napájecí soustavy

• Trakční měnirny

Podle provedení rozlišujeme:

- stabilní,
- kontejnerové,
- převozná,
- podpůrná.

Dalším ukazatelem je způsob obsluhy a řízení měnirny. Dnešní TM jsou obvykle bez trvalé obsluhy dálkově ovládané z energetických dispečinků provozovatelů drah.

- **Spínací stanice**

Umožňují propojení nebo oddělení jednotlivých úseků sítě mimo TM a zajišťují tak:

- zvýšení spolehlivosti napájení elektrizovaných tratí,
- zvýšení výkonnosti pevných elektrických trakčních zařízení,
- zvýšení propustnosti elektrizovaných tratí,
- snížení energetických ztrát a úbytků napětí v trakčním vedení,
- oddělení samostatných úseků trakčního vedení.

Podle provozního uspořádání mohou být:

- vícevypínačové,
- jednovypínačové.

- **Napájení a přenos elektrické energie na kolejová vozidla:**

Trolejové vedení:

- prosté nekompensované,
- prosté kompenzované,
- řetězovkové.

Přenos proudu na vozidlo je realizován prostřednictvím pantografového nebo polopantografového sběrače.

Napájecí kolejnice:

- pro vrchní odběr (např. jihovýchodní Anglie, berlínské metro),
- spodní odběr (např. pražské metro),
- boční odběr (např. hamburský a berlínský S-bahn),
- dvě napájecí kolejnice (např. londýnské metro).

Přenos proudu na vozidlo je proveden prostřednictvím kolejnicového sběrače.



Obr. 1 Polopantograf [6]



Obr. 2 Sběrač pro spodní odběr z třetí kolejnice [6]

Využití:

- **Tramvajová doprava**

- V ČR: Praha, Brno, Liberec, Ostrava, Plzeň, Olomouc, Most-Litvínov (rychlodráha)
- Tramvajová síť je napájena soustavou DC 600 V. Kladný pól je v troleji (na sběrači), záporný pól v kolejnicích. Toto zapojení však není pravidlem. Obrácená polarita je u nás např. v Ostravě a Brně (pro minimalizaci účinků bludných proudů v okolí TM).

- **Metro**

- V ČR: Praha
- Síť metra je napájena soustavou DC 750 V. Kladný pól je přiveden na napájecí kolejnici, záporný k poježděným kolejím.

- **Tram-train (kombinovaný provoz tramvaj-vlak) doprava**

- V Německu a západní Evropě.
- V Karlsruhe v Německu je celá tato soustava označována jako Stadtbahn. Drážní vozidla jsou uzpůsobena pro dvě napájecí soustavy (DC 750 V / AC 15 kV 16,7 Hz). Tato soustava vychází ze skutečnosti, že některé tratě železničního charakteru mají tramvajové napájení DC 750 V a na jiných linkách je využívána soustava AC 15 kV 16,7 Hz. Vozidlo svým vybavením umožňuje plynulý provoz na obou soustavách. Tato soustava je obecně označována jako S-Bahn.

Obdobných soustav využívá např.:

- RegioTram Kassel, Kassel.
- City-Bahn Chemnitz, Chemnitz.
- Saarbahn, okolí Saarbrücken, síť zasahuje i do Francie.
- Hybridstraßenbahn v Nordhausenu.
- Vogtlandbahn ve Zwickau.
- Köln-Bonner Eisenbahnen, dráhy Kolín nad Rýnem – Bonn.
- RijnGouweLijn, Nizozemsko.
- Tyne and Wear Metro, Anglie.

- **Železniční doprava**

- Pro vlakovou dopravu je tato soustava využívána ve velké míře např. na jihovýchodě Anglie, kde funguje hustá železniční síť s osobní dopravou elektrickými jednotkami jezdícími v poměrně krátkých intervalech.

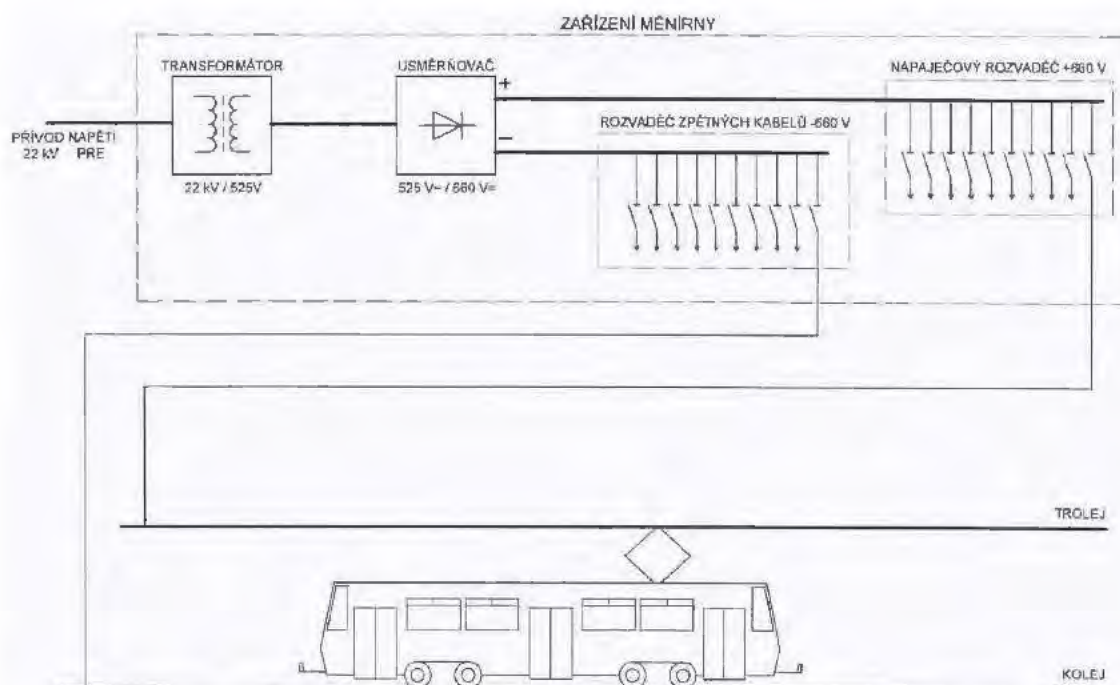
Způsob provozu u výše uvedených doprav:

- Tramvajové sítě se provozují jako paprskové, napájené jednostranně.
- Síť metra a železniční sítě se provozují jako oboustranně napájené s vazbou rychlovypínačů.

1.2 Schéma soustavy

Obecný popis trakční měřirny (TM):

- trojfázová rozvodna vn,
- transformátor vn/525 V nebo vn/650 V, podle napájené soustavy,
- usměrňovačové soustrojí,
- stejnosměrný rozváděč (+ pól),
- rozváděč zpětných kabelů pro rozvod kolejového pólu (- pól),
- systém kontroly a řízení,
- vlastní spotřeba,
- kabelové rozvody jednotlivých podsystémů,
- vnější uzemnění,
- prostorová rezerva pro napájecí transformovnu ostatních provozů AC 50 Hz.



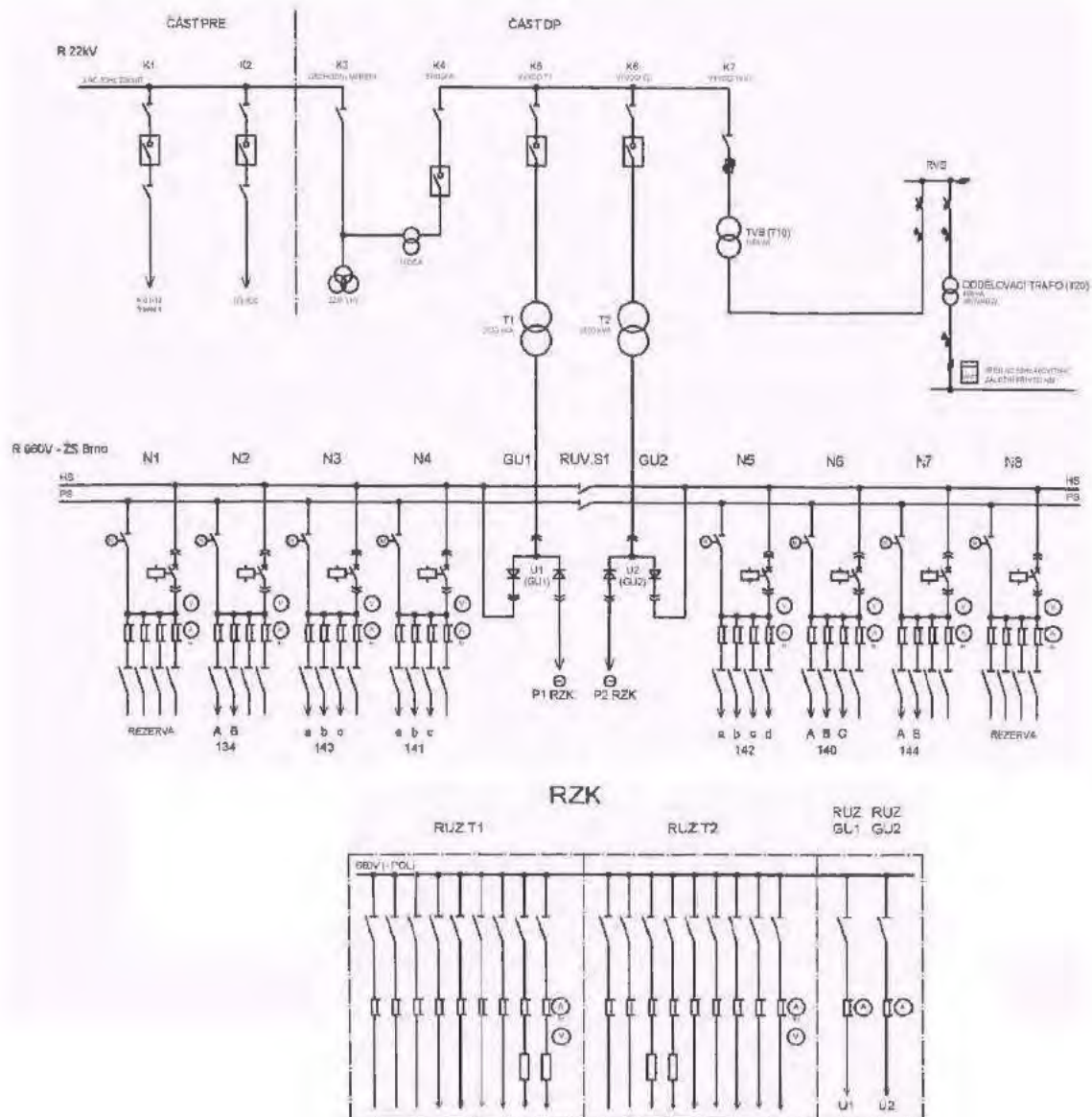
Obr. 3 Příklad přehledového schématu TM pro napájení tramvají [7]

Vybavení a uspořádání TM je závislé na použité DC technologii a na rozsahu a požadavcích na napájenou síť. Rozdíl mezi jednotlivými technologiemi je patrný z následujících schémat TM.

1.2.1 Diodová měřirna pro napájení tramvajové sítě

Jedná se o kobkovou rozvodnu 22 kV s vakuovými vypínači (např. ABB), trakčními transformátory (např. ČKD), s diodovou DC technologií (např. OHL-ŽS Brno), obr. 4.

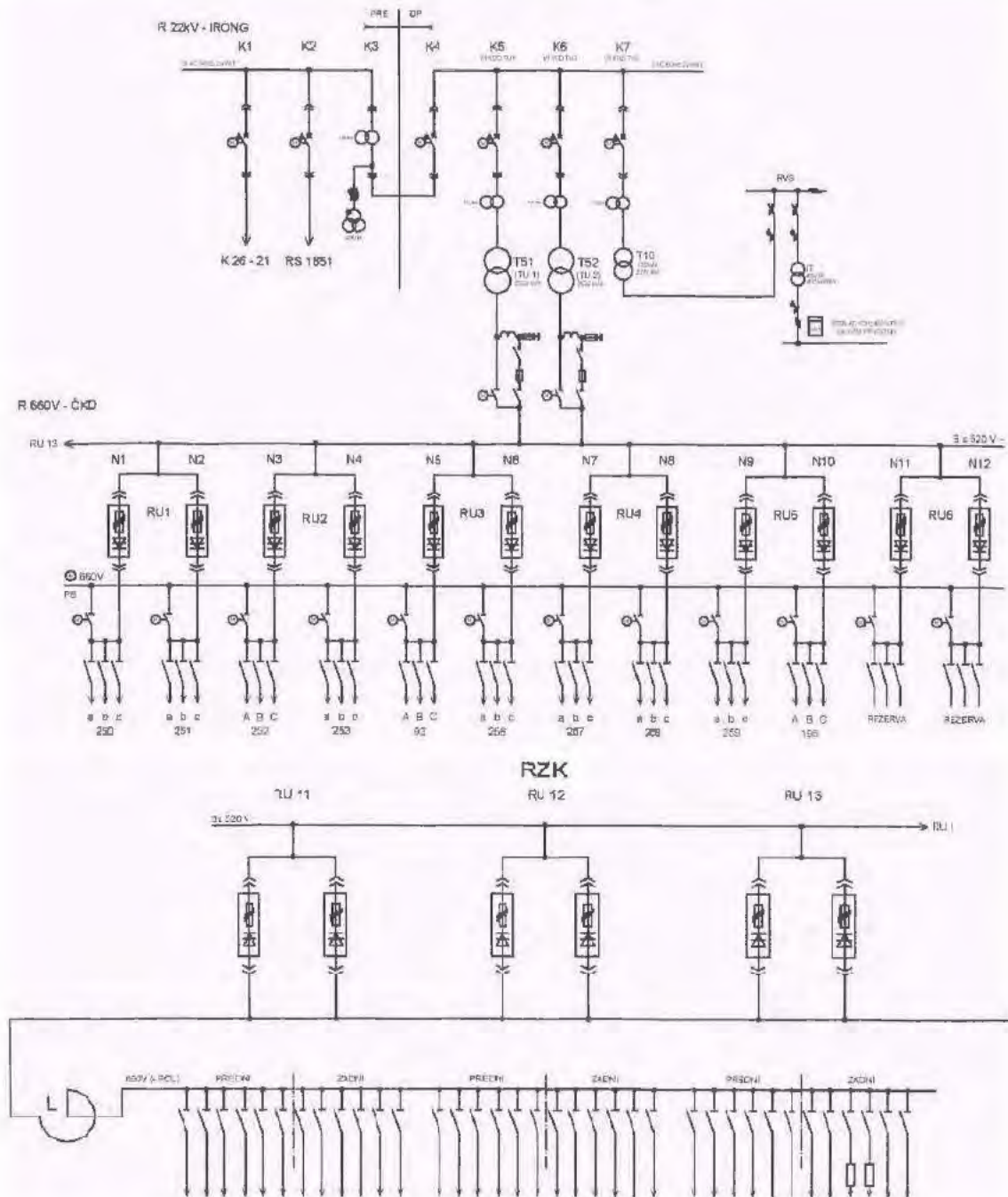
Z jejich výstupu je napájena DC přípojnice 660 V, ze které jsou přes rychlovypínače napájeny jednotlivé sekce s odpojovači kabelových vývodů. Přípojnicové odpojovače a odpojovače v podélném dělení umožňují variabilní zapojení napájení v případě poruch nebo odstávek zařízení.



Obr. 4 Schéma diodové tramvajové TM včetně rozváděče zpětných kabelů [7]

1.2.2 Tyristorová měnična pro napájení tramvajové sítě

Měnična s rozvodnou 22 kV Irong (skříňové provedení) s plynovými vypínači (např. EJF (ABB) Brno), trakčními transformátory (např. ČKD) a DC tyristorovou technologií (např. ČKD).



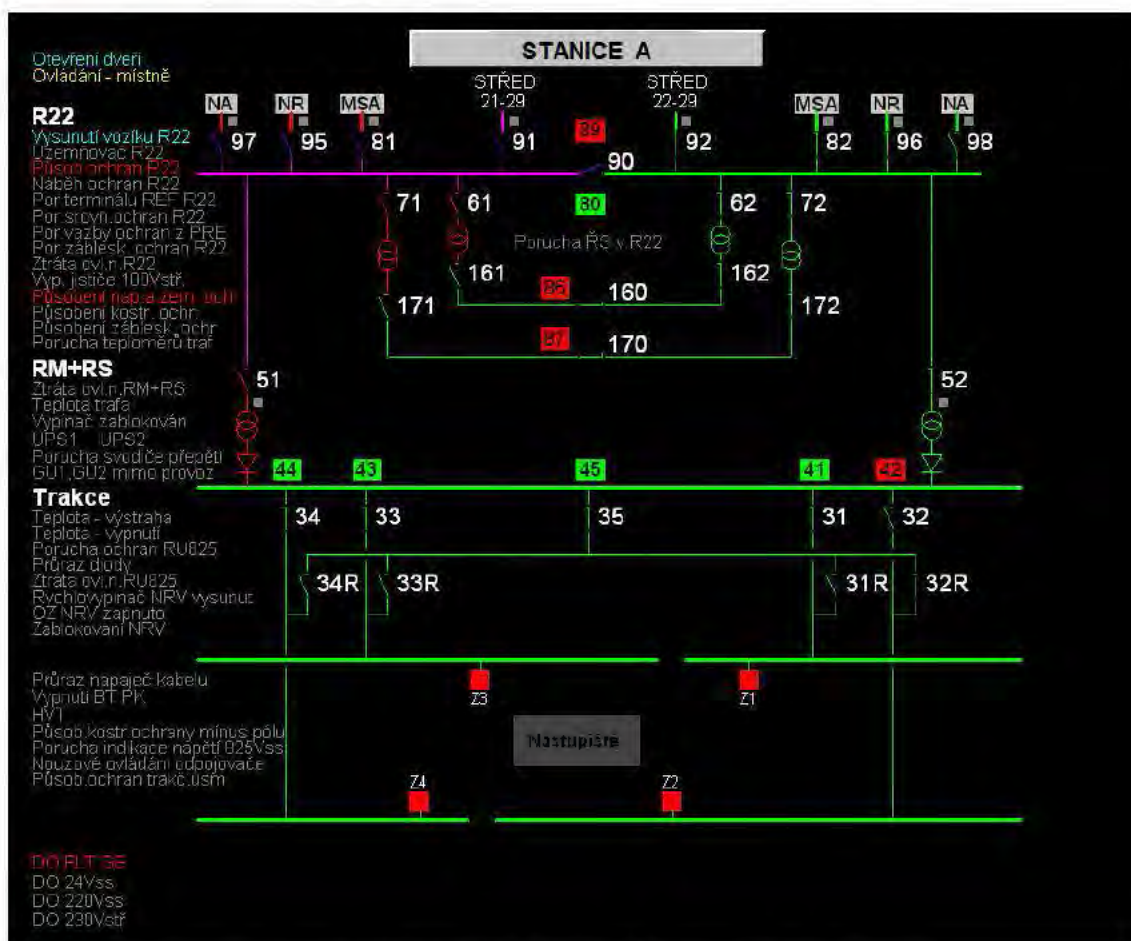
Obr. 5 Schéma tyristorové měničky, včetně RZK [7]

Na rozdíl od diodové měničky je výstup z tyristorových usměrňovačů připojen přímo na sekce odpojovačů vývodových kabelů. Odpadá zde nutnost použití rychlovypínače. Ochrana při poruše na vývodu je zde zajištěna prostřednictvím spínací logiky tyristorů, kdy při výskytu nadproudu (zkratu) ve vývodu dojde působením ochranného relé k zablokování spínacích impulsů pro tyristory, čímž je zamezeno dalšímu průchodu poruchového proudu. Je třeba si uvědomit, že se nejedná o přímé vypnutí zkratového proudu tyristorem.

1.2.3 Měnič pro napájení sítě metra

Pro zabezpečení maximální spolehlivosti dodávky elektrické energie má Pražské metro vlastní kruhovou kabelovou třífázovou síť 22 kV, 50 Hz, propojující vlastní distribuční stanice a distribuční stanice s měnírou. Výstupní napětí měnírou pro napájení trakce je DC 750 V. Z výše uvedených důvodů a pro snížení úbytků napětí na vedení a zvýšení přenosových schopností napájecího vedení je DC síť provozována jako oboustranně napájená se vzájemnou vazbou rychlo vypínačů. Princip vzájemné vazby rychlo vypínačů je popsán v kapitole 3.7.1.

Na obr. 6 je ukázka schématu TM stanice metra tak, jak ji vidí na obrazovce řídicího systému dispečer. Ze schématu je patrná variabilní možnost záložního napájení v případě poruchy, a to jak v soustavě 22 kV, tak v soustavách nižších napěťových úrovní. (V tomto případě je odstavena levá přípojnice 22 kV.)



Obr. 6 Schéma napájecí stanice v ŘS Pražského metra [8]

1.3 Trakční transformátory

Pro trakční transformátory platí norma ČSN EN 50329 [9]. Norma se týká trakčních transformátorů, které se používají v TNS nebo podél trati pro napájení trakčních soustav AC a DC nebo pro zajištění energie pro pomocné služby, tedy pro jednofázové trakční transformátory, pro jednofázové, trojfázové nebo vícefázové transformátory pro usměrňovače nebo transformátory pro měniče/střídače pro DC nebo AC trakční vedení, dále pro jednofázové autotransformátory pro trakční napájecí zdroje a jednofázové nebo trojfázové pomocné transformátory o trakčním napájecím napětí.

Z technologického hlediska se používají tři typy transformátorů:

- olejové,
- suché, vakuově impregnované,
- suché s vinutím zalitým v pryskyřici.

Jmenovité výkony distribučních a trakčních transformátorů jsou: 100, 250, 400, 630, 800, 1 000, 1 250, 1 600, 2 000, 2 500, 2 750 a 3 000 kVA.

Vstupní napětí trakčních transformátorů: Do hodnoty 35 kV (V Praze $U_{n\text{vst.}} = 22$ kV).

Výstupní napětí trakčních transformátorů: 525 V nebo 650 V s ohledem na požadované jmenovité napětí TM 660 V DC nebo 825 V DC.

Zapojení transformátoru: Y/y0, Y/d1.

Měnírny pro pražskou tramvajovou síť jsou osazeny trakčními suchými transformátory 1 600 kVA a 2 500 kVA. Měnírny metra jsou vybaveny vždy dvojicí trakčních transformátorů (TT) se dvěma přívodními kabely. Výkon TT je v tomto případě 2 750 kVA nebo 3 000 kVA. Distribuční transformátory (transformátory vlastní spotřeby) jsou potom dle potřeby voleny z řady jmenovitých hodnot transformátorů, obvykle 400, 630 nebo 1 000 kVA.

Výrobci TT: SGB, ČKD Elektrotechnika, ABB, Elin



Obr. 7 Trakční transformátor 1000 kVA, 22/0,65 kV [10]

1.4 Měníče

Pro vytvoření napětí DC se v současné době používají polovodičové křemíkové usměřovače (nahradily dříve používané rtuťové a rotační usměřovače). Trakční měniče 660 V a 825 V jsou používány v šestipulzním i dvanáctipulzním zapojení. Provedení těchto jednotek je buď klasické skříňové (nevýsuvné měniče), anebo dnes standardně dodávané a rozšířené výsuvné provedení. Pro instalaci přímo do kobky trakčního transformátoru se používají rámové měniče. Výstupní napětí měničů je uváděno o 10 % vyšší, než je hodnota trakční sítě (600 V DC resp. 750 V DC).

1.4.1 Nevýsuvné měniče

Nevýsuvné měniče jsou v provedení skříňovém nebo rámovém v třífázovém můstkovém zapojení s jedním až třemi paralelními prvky podle požadovaného proudu usměřovače. U většiny výrobců dnes patří ke standardní výbavě měničů přepěťová ochrana, která zajišťuje kompenzaci magnetizačního proudu trakčního transformátoru, signalizace teplot diod a indikace stavu pojistek diod a přepěťové ochrany.

1.4.2 Výsuvné provedení měniče

Diodový monoblok tvoří šest (šestipulzní měnič) nebo dvanáct (dvanáctipulzní měnič) vysoko-parametrových prvků, chlazených tepelnými trubicemi s přirozeným chlazením. Monoblok je vybaven čidly pro kontaktní signalizaci teploty. Blok bývá umístěn ve spodní části skříně na výsuvném vozíku.

Jmenovité proudy měničů: 800 A, 1500 A, 2250 A, 3000 A.

Jmenovité vstupní napětí: 525 V AC, 650 V AC.

Jmenovité výstupní napětí: 660 V DC, 825 V DC.



Obr. 8 Příklad výsuvného usměřovače pro TM metra (ČKD ELEKTROTECHNIKA, a.s.) [10]

1.5 Rozváděče měření

Vstupní částí měřicího je rozvodna vysokého napětí buď v klasickém kobkovém provedení s odpojovací a vypínači, nebo častěji v provedení výsuvného skříňového rozváděče typu IRODEL, IRONG, SR25, ZS1 apod. Rozváděče jsou osazeny třípólovými vypínači 22 kV AC vybavenými elektronickými ochranami. Pro zajištění vyšší spolehlivosti dodávky elektrické energie (především u tratí metra) je vn rozváděč obvykle koncipován s podélně děleným systémem přípojnic. Jsou tak vytvořeny samostatné sekce s možností propojení podélnou spojkou. Do každé sekce je zasmyčkováno kabelové vedení 22 kV vlastní sítě metra, které

propojuje jednotlivé elektrické stanice. U vstupních elektrických stanic je do každé sekce připojeno přívodní kabelové vedení z DS dodavatele elektřiny.

Měničenskou jednotku tvoří na straně DC tři základní rozvaděče.

- DC rozvaděč plus polarity – skládá se ze skříní trakčních měničů, vývodových napáječů a případně podélné spojky.
- DC rozvaděč záporné polarity – skříně zpětných kabelů, příp. podélné spojky a přívodních skříní, umožňujících pomocí instalovaného odpojovače odpojit výstupy trakčních měničů od skříní zpětných kabelů.
- Rozvaděč vlastní spotřeby, složený z jedné nebo dvou skříní s transformátory vlastní spotřeby, skříně AC rozvodu vlastní spotřeby a skříně DC vlastní spotřeby s akumulátory a nabíječkami.

Klasické provedení rozvaděčů je nahrazováno novým typem výsuvných rozvaděčů, které přinášejí výhodu ve formě úspory odpojovačů (nejsou potřeba). To vede k menším prostorovým nárokům na stavby – úspora místa. Další výhodou je snadná obsluha a údržba. V případě poruchy lze jednoduše vadnou jednotku prakticky, snadno a rychle nahradit jinou. Oprava a servis probíhají mimo rozvaděčovou skříň.

Mezi dodavatele rozvaděčů pro měřímny MHD v ČR patří zejména firmy: Merlin-Gerin (Schneider), Holec, Siemens, ABB, Elektrizace železnic Praha, a.s., ČKD Eelektrotechnika, a.s.



Obr. 9 Skříňový rozvaděč EZB 750 V DC části TNS, vpravo detail pole napáječe [11]

Příkladem rozvaděče pro TNS MHD soustavy DC 600 V (750 V) je skříňový, vzduchem izolovaný rozvaděč řady EZB 750 V DC, vyráběný a dodávaný firmou Elektrizace železnic (EŽ) Praha a.s. Rozvaděč je funkční celek určený pro rozvod plus pólu proudové soustavy DC, sestavený z jednotlivých modulů, které jsou mechanicky a elektricky navzájem propojené. Rozvaděčové pole je vždy složeno ze dvou modulů. Různým uspořádáním jednotlivých modulů vznikají funkční celky, např. napáječ, spojka hlavní přípojnice a usměřovač. Napáječové pole

rozdávěče se skládá z modulu s rychlovypínačem (EZB-DUR) a z modulu, jehož základní elektrickou výzbroj tvoří hlavní přípojnice kladného pólu 750 V DC, odpojovače, vzduchový odpínač, zařízení pro měření proudu a napětí (EZB-STC). K rozváděči EZB 750 V DC lze připojit dvanáctipulzní nebo šestipulzní diodový usměrňovač ve skříňovém provedení (EZB-USM). V horní přední části modulu je umístěn nn rozváděč pomocných obvodů a systému kontroly a řízení. Tento rozváděč je umístěn v odděleném prostoru mimo hlavní silový obvod. V rozváděči je umístěn řídicí programovatelný automat, DC ochrana, propojovací a spojovací součástky pomocných obvodů. Na dveřích je umístěn dotykový displej, který plní funkci ovládací a vizualizační. Systém kontroly a řízení integrovaný do jednotlivých polí rozváděče umožňuje místní řízení a ve vazbě na místní řídicí systém měnímy také dálkové a ústřední řízení.

1.6 Odpojovače, odpínače a výkonové vypínače

- Odpojovač - elektrický přístroj, který slouží k viditelnému odpojení elektrických zařízení od napájecího napětí bez zatížení (obvodem neprotéká elektrický proud).
- Odpínač - elektrický spínač, který je schopný vypínat a zapínat zátěž do hodnoty jmenovitého proudu.
- Vypínač - elektrický spínač, umožňující zapnutí a vypnutí elektrického zařízení pod zátěží, a to až do hodnot zkratových proudů udaných výrobcem.

1.6.1 Odpojovače

Odpojovač díky viditelnému odpojení slouží jako bezpečnostní prvek. Požaduje se, aby byl umístěn před a za vypínačem pro možnost údržby, příp. výměny vypínače a pro bezpečné odpojení zařízení při vypnutém vypínači. Jedním z možných provedení je odpojovač s funkcí zemniče, např. typ ODP...PZ výrobce MEP Postřelmov, u kterého dojde při maximálním otevření pohyblivého kontaktu k jeho zasunutí mezi pružné kontakty spojené s kostrou odpojovače a tím k uzemnění kontaktu. Odpojovače lze obecně ovládat ručním nebo motorickým pohonem.



Obr. 10 Odpojovače (klasický v měničném, úsekový pod krytem – metro) [12]



Obr. 11 Úsekové odpojovače trolejového vedení [13]

1.6.2 Odpínače

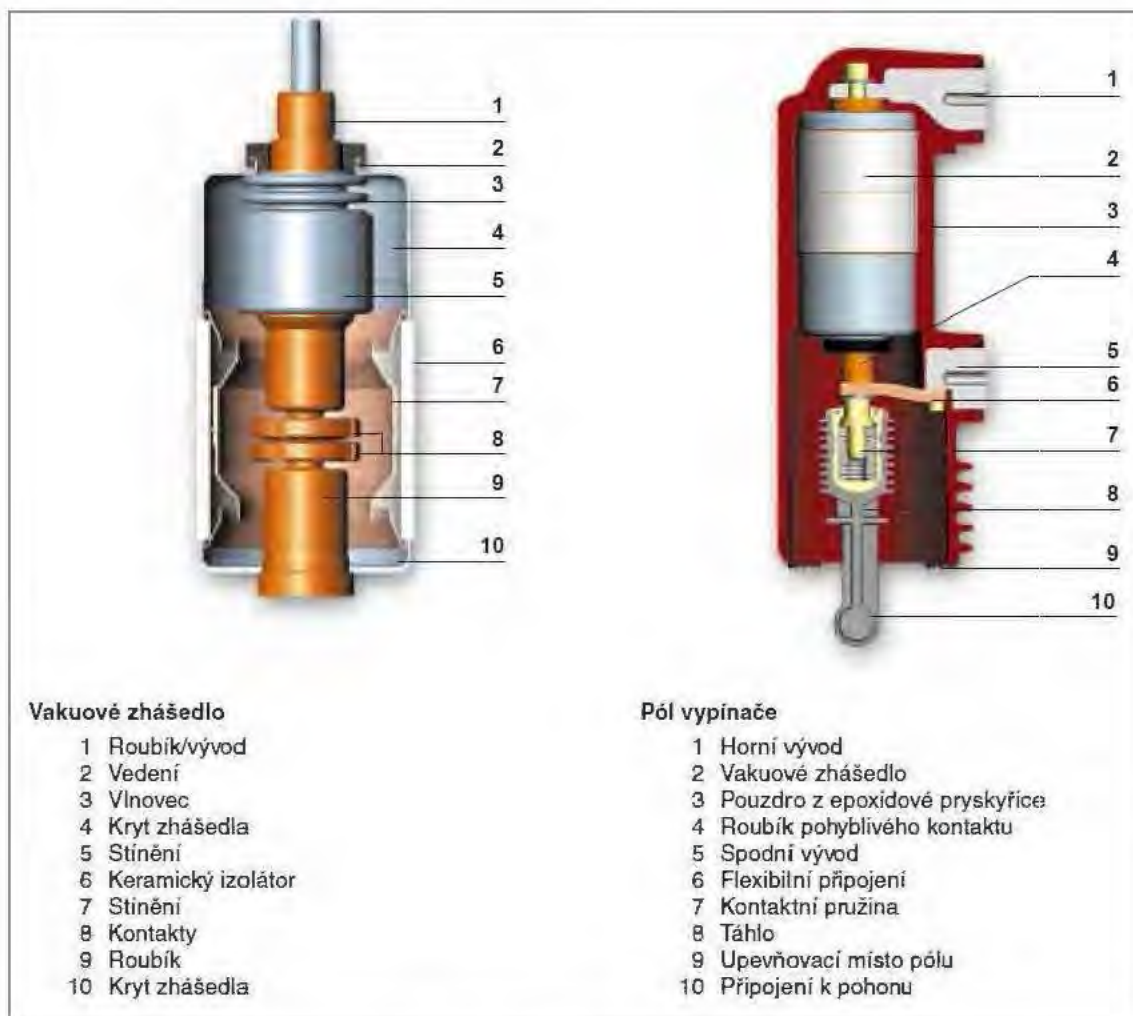
V trakční části měnírný se v podstatě nepoužívají. Můžeme se s nimi setkat v distribuční části napájecí stanice, a to obvykle u transformátorů vlastní spotřeby.

1.6.3 Výkonové vypínače

Rozvodny vn v kobkovém provedení byly osazovány vypínači s olejovou náplní nebo s plynem SF₆. Nově konstruované rozvodny skříňového typu jsou dnes vybavovány především vakuovými vypínači od firmy ABB typ VD4. Původní olejové vypínače jsou postupně nahrazovány těmito vypínači.



Obr. 12 Vakuový vypínač VD4 firmy ABB, s.r.o. [14]



Obr. 13 Detail vypínací části VD4 [14]

1.6.4 Rychlovypínače

Rychlovypínače představují elektrické přístroje určené pro zapínání a vypínání elektrických zařízení ve DC obvodech. Jsou určeny především pro použití ve funkci jističe vedení (trolejové sítě městských a železničních drah a metra), jističe pro usměrňovač nebo jako propojovací (úsekové) jističe.

U nás nejrozšířenějším typem jsou rychlovypínače DC řady N-RAPID výrobce MEP Postřelmov a rychlovypínače švýcarské firmy Sécheron. Pro představu je zde uveden zmíněný rychlovypínač N-RAPID s vybranými technickými parametry. Jedná se o jednopólové vypínače s magnetickým vyfukováním oblouku do zhašecí komory.



Obr. 14 Rychlovyypínač $U_n 750 V$
MEP Postřelmov [15]

Vybrané technické parametry:

Jmenovitý provozní proud	2 600 nebo 4 200 A
Jmenovitý zkratový proud	35 kA
Nejvyšší napětí sítě	900 V
Jmenovité impulsní výdržné napětí	25 kV
Nejvyšší obloukové napětí	1 500 V
Rozsah nastavení nadproudové spouště	1,5 – 13 kA

Vypínací čas rychlovyypínače:

dle typu použité spouště	
-elektromagnetická nadproudová	5 ms
-elektrodynamická spoušť	15 ms
-napěťová spoušť	60 ms
-podpěťová spoušť	120 ms

Mechanická životnost 20 000 prac. cyklů

Elektrická životnost s proudem 4 200 A 500 prac. cyklů

Rychlovyypínače se dnes nejčastěji dodávají ve výsuvném provedení pro rozvaděčové skříně měníren. Vozík s rychlovyypínačem umožňuje tři funkční režimy:

- režim pracovní, kdy je připraven rychlovyypínač k zapnutí nebo je zapnut,
- režim zkušební, kdy je rozpojen silový obvod, ale s rychlovyypínačem lze provádět spínací úkony, protože ovládací obvody zůstávají připojeny,
- režim revizní, kdy lze na vypínači provádět opravy a měření, ovládací obvody jsou odpojeny a vozík je z rozvaděče vysunut.

1.7 Ochrany

Původní reléové ochrany jsou nahrazovány novými elektronickými ochrannými jednotkami, které dle typu a konfigurace umožňují nastavení požadovaných ochranných funkcí. V měnících se však stále setkáváme i s ochranami typu A a AT jako nadproudovými a zkratovými ochranami ve vývodech. Jednotlivé rozvodny (měnirny) jsou osazeny ochranami dle vybavení a použité technologie. V zapouzdřených a skříňových rozvodnách se oproti kobkovým navíc instalují např. zábleskové a kostrové ochrany skříní.

1.7.1 Ochrany v části vn - vstupní pole měnirny 22 kV

- přepěťová ochrana,
- nadproudové a zemní ochrany,
- zkratové ochrany,
- kostrová ochrana rozvodny,
- záblesková ochrana.

1.7.2 Ochrany transformátoru 22/0,52 kV (22/0,65 kV)

- Buchholzovo plynové relé – signalizuje, případně vypíná transformátor při vzniku plynů v nádobě transformátoru (ochrana olejových transformátorů).

- Tepelná ochrana – zajistí vypnutí stroje při nadměrném oteplení vinutí transformátoru, aby nedošlo k jeho destrukci.
- Nadproudová a zkratová ochrana působící na vypínač na primární straně transformátoru v případě zkratu za transformátorem nebo při přetížení transformátoru. Společně chrání transformátor i usměrňovač.
- Kostrová ochrana a rozdílová ochrana – vypíná transformátor z primární strany v případě vnitřní poruchy stroje.

1.7.3 Ochrany usměrňovače

- Usměrňovací jednotky mají zpravidla vestavěné vlastní ochrany od výrobce - tepelná ochrana diod a indikace průrazu diod.
- Přepětová ochrana – působí na vypínač před transformátorem.

1.7.4 Ochrany rozvaděče

- Záblesková ochrana – ochrana vypíná napájení příslušné části rozvaděče ze všech možných stran napájení.
- Kostrová ochrana (zemní ochrana) – ochrana před nebezpečným dotykem při poruše, vypíná napájecí transformátor z primární strany, rychlovypínač na straně DC a případně spojku přípojníc.

1.7.5 Ochrany vývodových polí (napáječů)

- Nadproudová ochrana – zpravidla časově závislá nadproudová ochrana.
- Zkratová ochrana – jako časově nezávislá (nastavuje se na 4 000 A).
- Zemní ochrana – u tramvajových sítí před každým zapnutím napáječe proběhne měření odporu daného úseku.
- Plášťová ochrana kabelů – kontroluje napětí mezi pláštěm kabelu a uzemněním měnímy.

V ČR se nejčastěji setkáváme s integrovanými ochrannými jednotkami firem ABB, Siemens a ochrannými jednotkami firmy INCOS a Microsys.

Ze speciálních komponentů pro měnírenskou technologii jsou to např.:

- Moduly ŘS CT01 až 05 (INCOST) – integrovaná nadproudová, zkratová i strmostní ochrana.
- RKK(z) (Microsys Brno) – elektronické relé pro kontrolu celistvosti zpětných tramvajových kabelů.
- RKKU - elektronické relé pro kontrolu izolačního stavu napájecích trakčních kabelů.
- IN02 (NES Nová Dubnica) - kabelová ochrana pro měření výskytu nebezpečného dotykového napětí na stínění napájecích trakčních kabelů.
- REF 630 (ABB) – inteligentní elektronické zařízení, určené pro ochranu, měření a monitorování vývodů v rozvodnách a systémech pro radiální i okružní sítě.

Působení ochran, jejich poruchy a další informace jsou dálkově přenášeny na centrální dispečerské pracoviště. Ukázka panelu poruch jedné TNS pražského metra je na obr. 15.

R22																			
Ovládání MÍSTNĚ	61	71	51	95	97	81	91	90	92	92	96	98	52	72	62	Stav RS v R22 COM LON1 SYS LON2 Modem zap. Ztráta napětí Vypnutí jističe 100Vstř sekce A sekce E Půs. nap. a zem. ochrany sekce A sekce E Půs. kustrové ochrany sekce A sekce E Půs. zábleskové ochrany sekce A sekce E			
Vypínač vysunut	MA	61	71	51	95	97	81	91	90	90B	92	92	96	98	52		72	62	MB
Uzemňovač	MA	61	71	51	95	97	81	91	90	90B	92	92	96	98	52		72	62	MB
Působ. nadpr. ochran	61	71	51	95	97	81	91	90	92	92	96	98	52	72	62				
Působení ochran vazby s PRE	FK2	FK1	STR	SR0V	91	92	SR0V	STR	FK1	FK2									
Náběh ochran	61	71	51	95	97	81	91	90	92	92	96	98	52	72	62				
Porucha terminálu REF	61	71	51	95	97	81	91	90	90B	92	92	96	98	52	72		62		
Ztráta ovl. napětí	MA	61	71	51	95	97	81	91	90	90B	92	92	96	98	52		72	62	MB
Porucha ochran vazby s PRE	FK2	FK1	SR0V	91	DV2	92	SR0V	FK1	FK2										
Porucha zábleskové ochrany	95	97	81	91	92	92	96	98											
Přehřátí kabelu	91	92																	

Trakce						
Teplota - výstraha	51	52	GU51	GU52		
Teplota - vypnutí	51	52	GU51	GU52		
Teplota - porucha	51	52				
Usměrňovač vysunut			GU51	GU52		
Porucha přepětové ochrany - stř			GU51	GU52	- ss GU51-GU52	
Průraz dílů			GU51	GU52		
Ovládání MÍSTNĚ			GU51	GU52		
Rychlovypínač NRV vysunut	31	32	35	33	34	
OZ rychlovypínače zapnuto	31	32	35	33	34	
Rychlovypínač zablokovan	31	32	35	33	34	
Ztráta ovl. napětí RU825	31	32	35	33	34	- ss DN
			RU825V	HVT	- stř. DN	
Nouzové ovládání odpojovače	31R	32R	33R	34R		
Porucha napájec. kabelu NRV	31	32	33	34		
Ovládání MÍSTNĚ	31	32	35	33	34	
Půs. kustrové ochrany minus pólu					Porucha indikace napětí 825Vss	

Trafa 71, 72 + 61, 62						
Teplota trafo - výstraha	71	72	61	62		
- vypnutí	71	72	61	62		
- porucha	71	72	61	62		
RM + RS						
Vyp. nap. zablok.	171	170	172	161	160	162
Ztráta ovl. napětí	171	170	172	161	160	162
Ovládání MÍSTNĚ	RM	RS				

Dálkové ovládání	
24Vss	<input type="checkbox"/>
220Vss	<input type="checkbox"/>
230Vstř.	<input type="checkbox"/>
Fl. OE	<input type="checkbox"/>

Nastavení ochran	
NRV	31 32 33 34 35
R22	95 96 97 98 91 92 91 93 90
ZAPNUTO - základní	<input type="checkbox"/>
ov. FNK (10 - 200V)	<input type="checkbox"/>
	WTF ZAP

Obr. 15 Ukázka zobrazení panelu poruch v ŘS metro Praha [8]

1.7.6 Ochranné prvky v trakčním vedení:

- Růžkové bleskojistky.
- Omezovače přepětí - zařízení určená pro ochranu měřičů a na ně navazujících DC sítí elektrických trakčních soustav před účinky atmosférických a spínacích přepětí (dle ČSN EN 50163).

Příkladem omezovačů přepětí používaných pro MHD jsou výrobky řady PSP*/10/III (určené pro venkovní prostředí) a PSP1*/10/III (pro vnitřní použití). V případě použití omezovače tohoto typu jako linkového svodiče může tento prvek sloužit současně jako podpěrný nebo závěsný izolátor. Funkční část svodičů je tvořena sloupcem varistorů dimenzovaných na trvalé provozní napětí, vnější izolační plášť je tvořen silikonovým kaučukem.



Obr. 16 Růžková bleskojistka [11]



Obr. 17 Omezovač přepětí PSP 1/10/III [16]

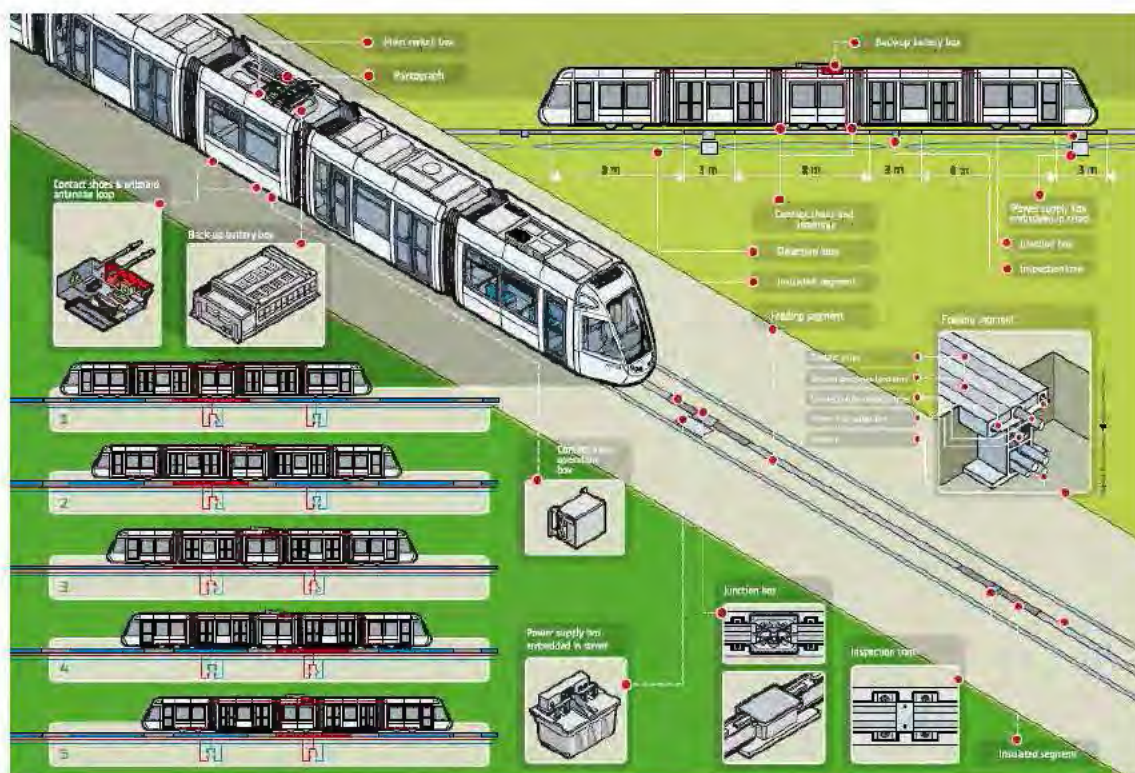


Obr. 18 Omezovač nízkého napětí HL120 [16]

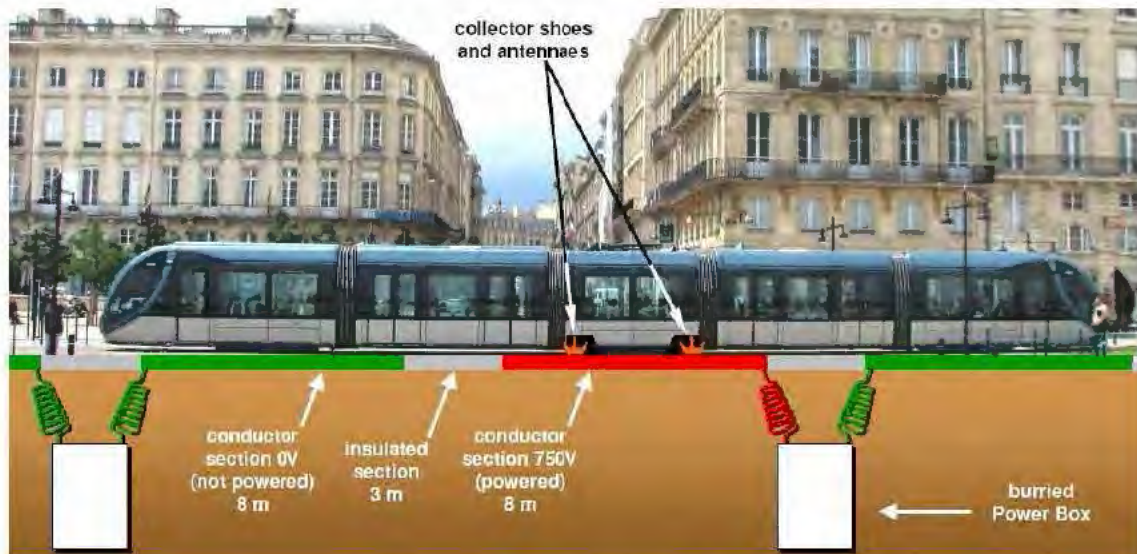
Pro ochranu před nebezpečným dotykovým napětím v případě poruchy se používají v trakčních sítích oddělovací bleskojistky pro vyrovnání potenciálu (tzv. průrazky). Příkladem je omezovač nízkého napětí HL120. Využívá se pro účinnou ochranu osob, které se mohou dostat do kontaktu s neživými částmi kovových konstrukcí při úderu blesku nebo při poruchách trakčního vedení. Tento omezovač se instaluje přímo na chráněnou stavební konstrukci tak, aby v případě jeho aktivace bylo vytvářeno vodivé spojení mezi touto konstrukcí a kolejištěm.

1.8 Nové trendy v napájecí soustavě DC 750 V

Snaha o odstranění trolejového vedení především z estetických důvodů vede k hledání nových řešení napájení tramvají a příměstských vlaků. Jedním ze způsobů je pozemní napájecí soustava APS (Aesthetic Power Supply) dodávaná firmou Alstom, využívající napájení vozidel prostřednictvím speciální třetí napájecí koleje umístěné mezi kolejnicemi. Tato kolej je složena z 8 metrových vodivých segmentů oddělených 3 metrovými izolačními úseky. Po 22 m jsou pod zemí umístěny napájecí body. Přenos napětí na vozidlo je realizován pomocí kolejových sběračů umístěných pod vozidlem. Ke spuštění napájení jednotlivých kolejových segmentů dochází kódovaným rádiovým signálem mezi vozidlem a přijímačem v zemi, a to pouze v místě bezpečně zakrytém vozidlem. Ostatní části kolejnice jsou bez napětí. Tím je zajištěna bezpečnost chodců. Popsanou soustavu znázorňuje obr. 19. Je-li vozidlo vybaveno pantografem i kolejovými sběrači, je umožněn plynulý přechod mezi soustavou napájení z vrchního trolejového vedení a soustavou napájení pomocí třetí kolejnice.



Obr. 19 Princip činnosti APS [17]



Obr. 20 Místo napájení APS [17]

S touto soustavou napájení je možné se setkat např. v Bordeaux, Reims, Angers, Orleans ve Francii nebo v Dubaji ve Spojených Arabských Emirátech.

Kontrolní otázky:

- 1.1 Jaké jsou výhody a nevýhody soustavy DC 600 kV a soustavy DC 750 kV ?
- 1.2 Jaké je základní schéma napájení soustavou DC 600 kV a soustavy DC 750 kV ?
- 1.3 Jaké jsou základní prvky a jejich funkce u soustavy DC 600 kV a soustavy DC 750 kV ?



2 SOUSTAVA DC 1,5 kV



Klíčová slova:

Charakteristika soustavy, schéma soustavy, trakční transformátor, měnič, rozváděč měnirny, odpojovač, odpínač, výkonový vypínač, ochrana.



Cíl studia:

Seznámení studenta s trakční napájecí soustavou DC 1,5 kV, její charakteristikou a využitím včetně příkladů a popisu základních technologických prvků používaných u této soustavy.



2.1 Charakteristika soustavy a využití

Tato napájecí soustava patří k počátkům rozmachu elektrizace železnic. S rostoucími požadavky na potřebný elektrický výkon vozidel se však ukazuje jako nevhodná. V současné době je soustava DC 1500 V provozována pro napájení elektrických drah na jihu Francie a v Nizozemsku, v ČR je dosud tato soustava ponechána na trati Tábor- Bechyně. Obecně byl vývoj této soustavy u nás ukončen ve 30. letech 20. století.

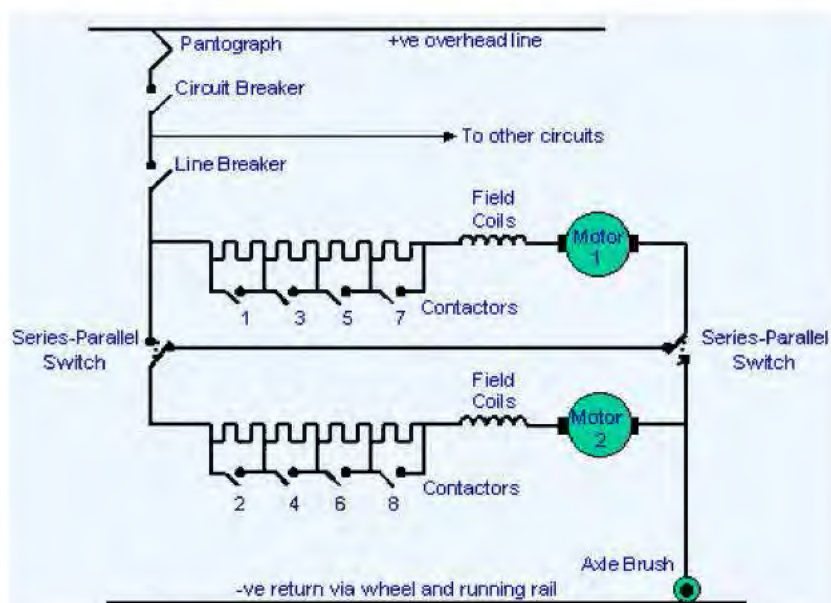
Původní napájecí lokální zdroje (dynama poháněná parními stroji nebo vodní elektrárny vyrábějící napětí DC) byly nahrazeny měnícími napájecími z DS. Schéma a princip měnící jsou shodné s TM popsanou u soustavy DC 750 V. Výhodou napájecích soustav DC připojených na DS je téměř symetrické zatížení třífázové DS na rozdíl od jednofázových trakčních napájecích soustav AC, které se staly nástupci soustav DC [2, 3]. Vhodným zapojením trakčních transformátorů a měničů je dostatečně eliminován vliv vyšších harmonických směrem do DS 22 kV a není tedy nutné používat filtrační zařízení pro splnění požadavků dodavatele elektrické energie ohledně zkreslení napětí.

Výhody:

- s ohledem na velikost jmenovitého napětí DC trakčních motorů (1500 V) je možné motory hnacích vozidel zapojovat paralelně, což vede ke zlepšení adhezních vlastností ve druhé fázi rozjezdu. Zapojení s možnostmi přepínání trakčních motorů je znázorněno na obr. 21. U vyšší hladiny napětí (napájecí soustava DC 3 kV) je třeba mít zapojeny vždy alespoň dva motory do série.
- nízká hodnota DC usnadňuje zhašení elektrického oblouku při zkratu a klade nižší nároky na izolaci.

Nevýhody:

- velké hodnoty proudů trakčního vedení, což vyžaduje použití zesilovacího vedení a hustší síť napájecích stanic



Obr. 21 Schéma řízení výkonu jednoduchých trakčních DC motorů [18]

2.2 Schéma soustavy

Schéma soustavy je v podstatě shodné se schématem uvedeným v kapitole 3.2 pro soustavu DC 3 kV, která je jedním ze dvou hlavních trakčních napájecích soustav v ČR. S ohledem na tuto skutečnost je podrobnější popis a rozbor schématu zařazen do kapitoly 3. Odlišnost spočívá v úrovni napájecího napětí trakční sítě.

2.3 Trakční transformátory

Trakční transformátory pro usměrňovací jednotky jsou dodávány v provedení suchém nebo olejovém. Hodnota primárního napětí je v souladu s místně provozovanou DS. Sekundární napětí trakčních transformátorů je 1 500 V. Zapojení transformátoru je Y/y0 nebo Y/d1.

2.4 Měniče

Pro soustavu DC 1,5 kV platí stejný princip úpravy napájecího napětí jako u soustavy DC 600 V (750 V). Obecně výrobci trakčních měničů dodávají výrobky pro všechny napájecí soustavy DC ve srovnatelném provedení, lišící se pouze použitými prvky s ohledem na velikost požadovaného napětí a výkonu a tedy i izolačních a tepelných parametrů, což má vliv na velikost a rozměry celého zařízení. Příkladem tuzemského dodavatele je např. ČKD Elektrotechnika, a.s. dodávající pro soustavu DC 1,5 kV diodové měniče v rámovém provedení. Oproti měničům pro soustavu DC 3 kV jsou vybaveny vn pojistkami pro každou diodu. Výbava těchto měničů může zahrnovat ochrany pro omezení komutačních a spínacích přepětí, svodič přepětí na DC straně, zatěžovací odpor pro omezení maximálního napětí při chodu bez zátěží, případně dvoustupňovou signalizaci teploty diod.



Obr. 22 Měnič UKTB 2x3M 01516 [10]

Tab. 1 Přehled vyráběných typů trakčních měničů ČKD Elektrotechnika, a.s.

Typ měniče	Napět'ová soustava	Jmen. proud	Spojení	Přepět'ová ochrana	Signalizace průrazu diody	Svodič přepětí	Provedení
5 UKTB-3M-00733	3 kV	750A 1500 A	6p 12p	externí UZP-101	elektronická	ne	1 rám 2 rámy
18 UKTB-3M-00833	3 kV	800A 1600 A	6p 12p	ano	elektronická	ano	1 rám 2 rámy
26 UKTB-2x3M-01516	1,5 kV	1500A	12p	externí	od pojistek	ano	1 rám
28 UKTB-2x3M-01533	3 kV	1500A	12p	ano	elektronická	ano	2 skříně
29 UKTB-3M-002216	1,5 kV	2200A	6p	ano	od pojistek	ano	1 rám

Trakční měniče bývají obvykle doplněny tlumivkami pro vyhlazení zvlnění a omezení strmosti nárůstu zkratových proudů při přechodových dějích v navazujících trakčních obvodech za diodovými měniči. Jedná se o vzduchové diskové tlumivky vnitřního provedení.



Obr. 23 Vzduchová tlumivka TLV [10]

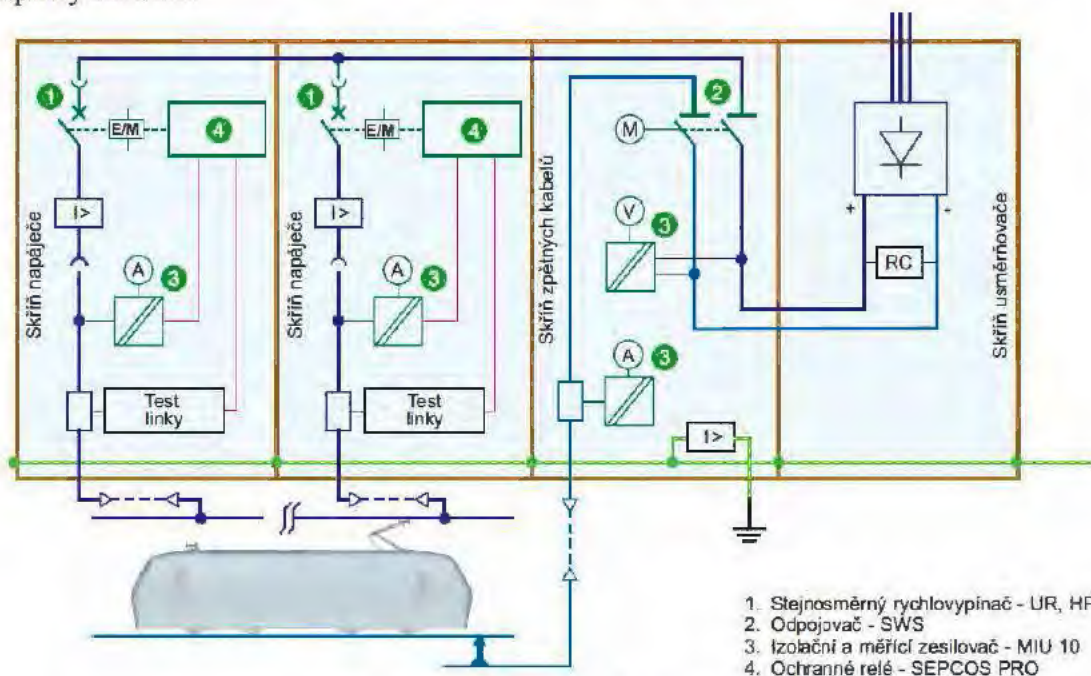
Standardními typy tlumivek jsou:

TLV 139/45 4 mH 1 100 A

TLV 168/53 4 mH 1 750 A

2.5 Rozváděče měření

TM bývá připojena na DS vvn nebo vn. Připojení TM je možné na průběžné vedení AC 110 kV nebo na dvě samostatná koncová vedení 110 kV s vlastní rozvodnou 110 kV. Další možností je v souladu s ČSN 33 3505 připojení na koncové vedení 110 kV s vlastní rozvodnou vvn a druhým přívodem 22 kV. Rozvodny AC připojené do vn sítě pro TM se budují v zásadě ve vnitřním provedení. Připojení TM na distribuční vedení vn je možné buď na průběžné vedení AC 22 kV, nebo na koncová vedení AC 22 kV, případně jako samostatná oddělená část ve společném prostoru s distribuční rozvodnou. Podrobným popisem zapojení TM se zabývají kapitoly 3.2 a 3.5.



Obr. 24 Schéma DC části měřicího rozváděče [19]

Skutečné provedení výše uvedeného schématu skříňového rozváděče s polem usměrňovače a se dvěma výstupními moduly osazenými rychlovyběhači firmy Sécheron je na obr. 25.



Obr. 25 Rozváděč měřicí TNS (Sécheron) [19]

2.6 Odpojovače, odpínače a výkonové vypínače

Použití a funkci jednotlivých prvků popisuje kapitola 1.6. V tomto odstavci jsou uvedeny jen některé používané typy spínacích prvků různých výrobců v ČR a jejich vybrané parametry.

2.6.1 Odpojovače

Růžkové trakční odpojovače bez uzemňovače:

Odpojovač 1,5 kV/2 000 A firmy EŽ Praha, a.s.,

ODP ...U, v řadě $I_n = 1\ 000\ \text{A}$, $2\ 000\ \text{A}$, $3\ 150\ \text{A}$ výrobce MEP Postřelmov,

QAV 1,5 kV, $3\ 000\ \text{A}$, výrobce IVEP Brno, a.s.

Růžkové trakční odpojovače s uzemňovačem:

Odpojovač 1,5 kV/2 000 A se zemnicím nožem firmy EŽ Praha, a.s.,

ODP ...PZ, v řadě $I_n = 1\ 000\ \text{A}$, $2\ 000\ \text{A}$, $3\ 150\ \text{A}$ výrobce MEP Postřelmov,

EQAV 1,5 kV, $3\ 000\ \text{A}$, výrobce IVEP Brno, a.s.






Obr. 26 Růžkový trakční odpojovač [11]



Obr. 27 Trakční odpojovač s uzemňovačem [11]

2.6.2 Rychlo vypínače

Tab. 2 Rychlo vypínače pro 1,5 kV DC (Vybrané technické parametry)

<p>N-RAPID</p> 	<p>MEP Postřelmov</p> <table border="0"> <tr> <td>Jmenovitý provozní proud</td> <td>2600 nebo 4200 A</td> </tr> <tr> <td>Jmenovitý zkratový proud</td> <td>25 kA</td> </tr> <tr> <td>Nejvyšší napětí sítě</td> <td>1800 V</td> </tr> <tr> <td>Jmenovité impulsní výdržné napětí</td> <td>25 kV</td> </tr> <tr> <td>Nejvyšší obloukové napětí</td> <td>3000 V</td> </tr> <tr> <td>Rozsah nastavení nadproudové spouště</td> <td>1,5 – 13 kA</td> </tr> </table>	Jmenovitý provozní proud	2600 nebo 4200 A	Jmenovitý zkratový proud	25 kA	Nejvyšší napětí sítě	1800 V	Jmenovité impulsní výdržné napětí	25 kV	Nejvyšší obloukové napětí	3000 V	Rozsah nastavení nadproudové spouště	1,5 – 13 kA
Jmenovitý provozní proud	2600 nebo 4200 A												
Jmenovitý zkratový proud	25 kA												
Nejvyšší napětí sítě	1800 V												
Jmenovité impulsní výdržné napětí	25 kV												
Nejvyšší obloukové napětí	3000 V												
Rozsah nastavení nadproudové spouště	1,5 – 13 kA												
<p>IR6040SV</p> 	<p>Microelettrica Scientifica Italy</p> <table border="0"> <tr> <td>Jmenovitý provozní proud</td> <td>4000 A</td> </tr> <tr> <td>Jmenovitý zkratový proud</td> <td>70 kA</td> </tr> <tr> <td>Nejvyšší napětí sítě</td> <td>1800 V</td> </tr> <tr> <td>Rozsah nastavení nadproudové spouště</td> <td>2 – 5 kA</td> </tr> </table>	Jmenovitý provozní proud	4000 A	Jmenovitý zkratový proud	70 kA	Nejvyšší napětí sítě	1800 V	Rozsah nastavení nadproudové spouště	2 – 5 kA				
Jmenovitý provozní proud	4000 A												
Jmenovitý zkratový proud	70 kA												
Nejvyšší napětí sítě	1800 V												
Rozsah nastavení nadproudové spouště	2 – 5 kA												
<p>UR40.82</p> 	<p>Sécheron – Švýcarsko</p> <table border="0"> <tr> <td>Jmenovitý provozní proud</td> <td>4000 A</td> </tr> <tr> <td>Jmenovitý zkratový proud</td> <td>80 kA</td> </tr> <tr> <td>Nejvyšší napětí sítě</td> <td>1800 V</td> </tr> <tr> <td>Rozsah nastavení nadproudové spouště</td> <td>2 – 15 kA</td> </tr> </table>	Jmenovitý provozní proud	4000 A	Jmenovitý zkratový proud	80 kA	Nejvyšší napětí sítě	1800 V	Rozsah nastavení nadproudové spouště	2 – 15 kA				
Jmenovitý provozní proud	4000 A												
Jmenovitý zkratový proud	80 kA												
Nejvyšší napětí sítě	1800 V												
Rozsah nastavení nadproudové spouště	2 – 15 kA												

2.7 Ochrany

Vybavení měníren a jednotlivých rozváděčů je obdobné jako u napájecí soustavy DC 750 V, kapitola 1.2, kapitola 1.4 až kapitola 1.7.

Kontrolní otázky:

- 2.1 Jaké jsou výhody a nevýhody soustavy DC 1,5 kV ?
- 2.2 Jaké je základní schéma napájení soustavou DC 1,5 kV ?
- 2.3 Jaké jsou základní prvky a jejich funkce u soustavy DC 1,5 kV ?



3 SOUSTAVA DC 3 kV



Klíčová slova:

Charakteristika soustavy, schéma soustavy, trakční transformátor, měnič, rozváděč měřirny, odpojovač, odpínač, výkonový vypínač, ochrana.



Cíl studia:

Seznámení studenta s trakční napájecí soustavou DC 3 kV, její charakteristikou a využitím včetně příkladů a popisu základních technologických prvků používaných u této soustavy.



3.1 Charakteristika soustavy a využití

Napájecí soustava DC 3 kV se využívá pro železniční síť především v Belgii, Španělsku, Itálii, Polsku, ČR (severní část) a na Slovensku [20]. Základní charakteristika této soustavy je shodná s ostatními napájecími soustavami DC popsány v předcházejících kapitolách. Liší se velikostí hodnot izolační hladiny pro toto vyšší napětí a zvýšenými nároky na spínací prvky s ohledem na napětí při přechodových jevech a zhášení oblouku při vypínání. Ve srovnání se soustavou DC 1,5 kV umožňuje celkově vyšší výkonové zatížení tratě a vykazuje menší ztráty ve vedení. Omezí se tak nutnost zesilovacích vedení. Charakteristické pro trakční soustavu DC 3 kV je tzv. oboustranné napájení, kdy jednotlivé úseky tratě jsou napájeny ze dvou protilehlých TM současně [2, 3, 21, 22, 23, 24]. To vede k vyšší spolehlivosti napájení a k poměrnému rozložení zátěže na jednotlivé napáječe dle polohy vozidla. Shodně je napájena i soustava metra popsána v soustavě DC 750 V, kapitola 1.

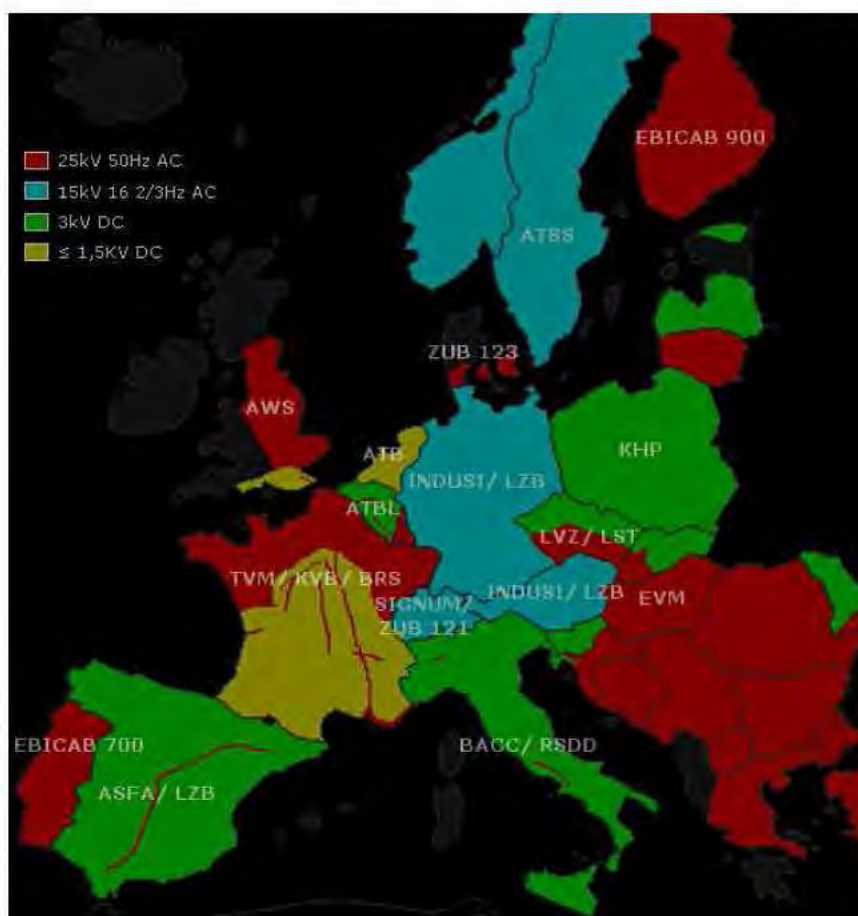
Výhody:

- Jednodušší hnací vozidla, jednoduchá regulace trakce
- Možnost rekuperace – snadná rekuperace do soustavy DC 3 kV, kdy díky diodovým usměrňovačům na TM nedochází k přetokům výkonu do napájecí DS a k jejímu ovlivňování. Je však třeba zajistit, aby v napájecím úseku s rekuperujícím vozidlem bylo další vozidlo, které dodávanou energii spotřebuje, příp. jiný akumulární prvek schopný tuto energii pojmout.
- Oproti soustavě DC 1,5 kV nelze s ohledem na velikost jmenovitého napětí DC trakčních motorů jednotlivé motory zapojovat paralelně. Toto zapojení je možné pouze při použití tzv. motorových skupin, které tvoří vždy alespoň dva DC motory v sérii.

Nevýhody:

- Ve srovnání s napájecími soustavami AC provozovanými na vyšších napětíových hladinách je soustava DC 3 kV zatížena vysokými trakčními proudy a s tím souvisejícími vysokými ztrátami na vedení.
- Větší množství TNS. Vzdálenost TM se pohybuje do cca 20 km.
- TM jsou co do technologie složitější ve srovnání s transformovny pro soustavy AC.
- Problematika zhášení oblouku při přechodových jevech.
- Problematika bludných proudů.

Rozsah využití jednotlivých napájecích soustav v rámci Evropy a na území ČR je patrný z následujících obr. 28 a obr. 29. Od přechodu ze soustavy DC k provozně levnější soustavě AC se z ekonomických důvodů (přebudování infrastruktury) prozatím upustilo.



Obr. 28 Napětí napájecích soustav železničních sítí [25]



Obr. 29 Železniční síť ČR [25]



3.2 Schéma soustavy

3.2.1 Trakční měnič

- rozvodna vvn, u ČD na hladině napětí 110 kV,
- stanoviště s 3-fázovými transformátory vvn/23 kV,
- rozvodna vn (zpravidla 22 kV),
- usměrňovačové soustrojí (3 kV),
- stejnosměrný rozváděč pro rozvod trolejového pólu (+ pól),
- rozváděč zpětných kabelů pro rozvod zpětného vedení (- pól),
- systém kontroly a řízení,
- vlastní spotřeba,
- kabelové rozvody jednotlivých podsystémů,
- vnější uzemnění,
- prostorová rezerva pro napájecí transformovnu 6 kV 50 Hz.

Schémata zapojení jednotlivých částí TNS jsou znázorněny na obr. 31 až obr. 34.

Provedení měření:

- stabilní,
- kontejnerové,
- stavebnicové,
- převozná trakční napájecí stanice.



Obr. 30 Převozná měnič [12]

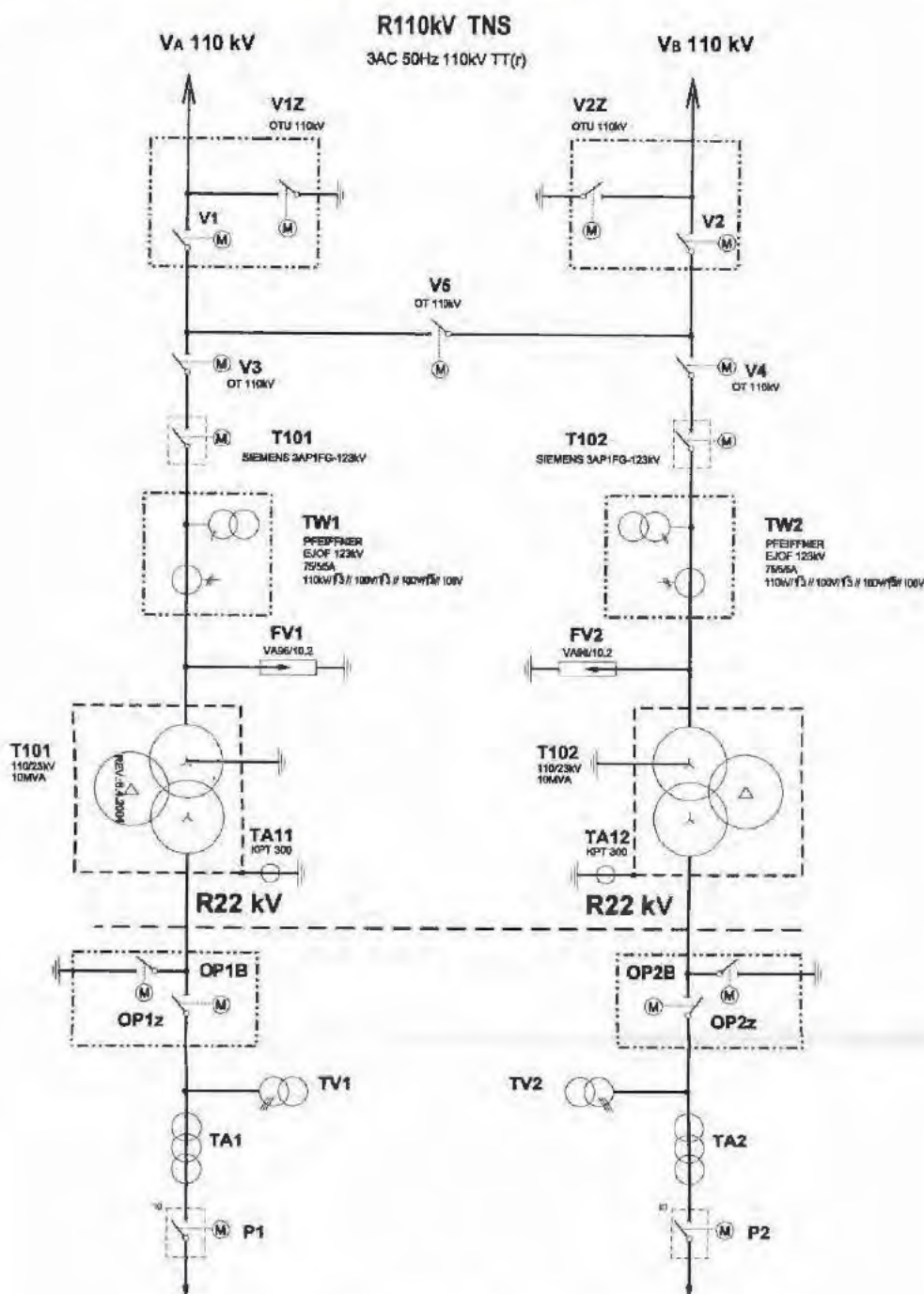
Měniče jsou obvykle dálkově ovládané z energetických dispečinků provozovatelů drah. Dálkové ovládání umožňuje propojení nebo oddělení jednotlivých úseků sítě i v některých místech mimo měniče v tzv. spínacích stanicích.

3.2.2 Spínací stanice

- Stejnosměrný rozváděč DC 3 kV (pro rozvod trolejového pólu)
- Systém kontroly a řízení
- Kabelové rozvody, v odpovídajícím rozsahu pro jednotlivé podsystémy
- Vnější uzemnění a přivedení kolejového pólu

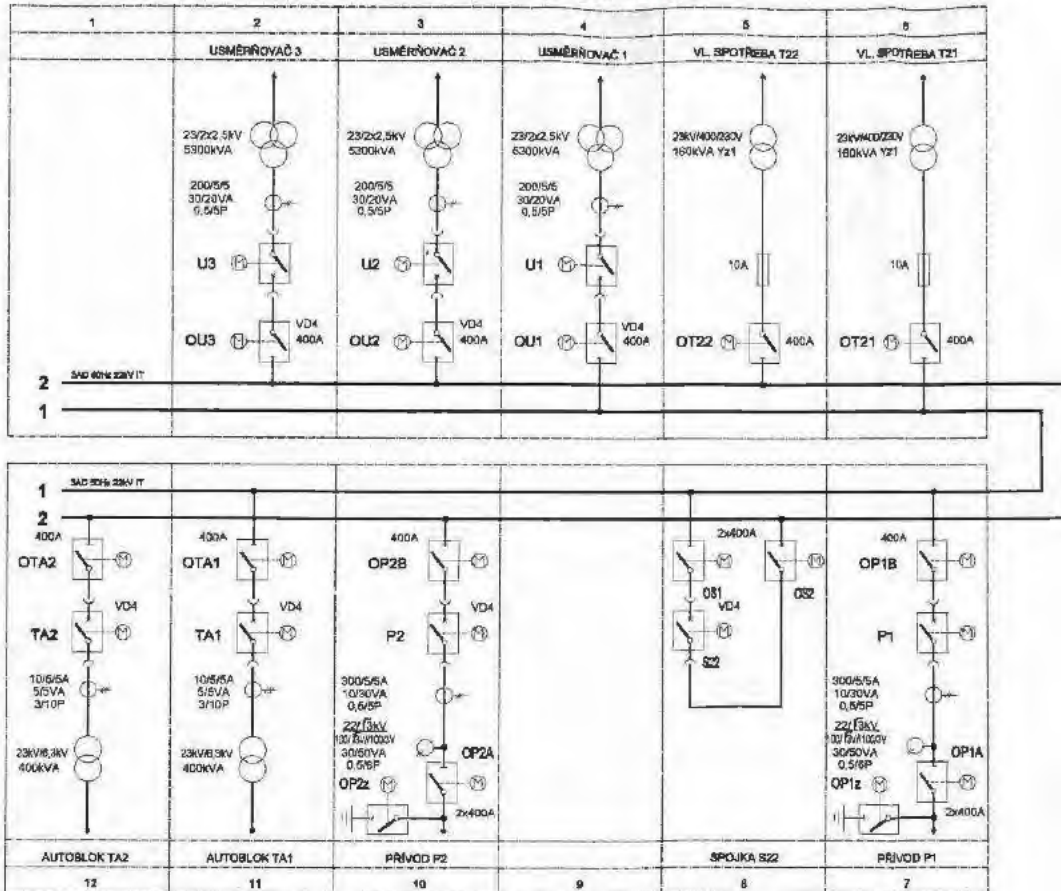
TM bývá připojena na DS vvn 110 kV nebo na síť vn 22 kV (35 kV). Nejčastější provedení rozvodné části vvn je zapojení „H“, tedy se dvěma přívodními linkami 110 kV a dvěma transformátory 110/23 kV s možností propojení linek podélnou spojkou, obr. 31. Rozvodny vn

bývají v provedení jednosystémovém s podélným dělením (úsporné řešení) nebo dvousystémovém s příčnou spojkou přípojnic, jak znázorňuje schéma na obr. 32. Z hlediska spolehlivosti dodávky energie a údržby zařízení je toto druhé řešení výhodnější. Dnes rozšířené skříňové provedení AC rozvoden je zaměřeno především na první způsob provedení, tj. jednosystémové rozvodny s podélným dělením bez vývodových odpojovačů. Podobné je též provedení skříňových rozváděčů stejnosměrné části TM. Její schéma zachycuje obr. 34. V tomto konkrétním případě se však jedná o prostou jednosystémovou rozvodnu bez dělení přípojnic. Distribuční část TM pro napájení autobloku 6 kV je znázorněna na obr. 33. Jedná se zde opět o jednosystémovou rozvodnu s podélným dělením.



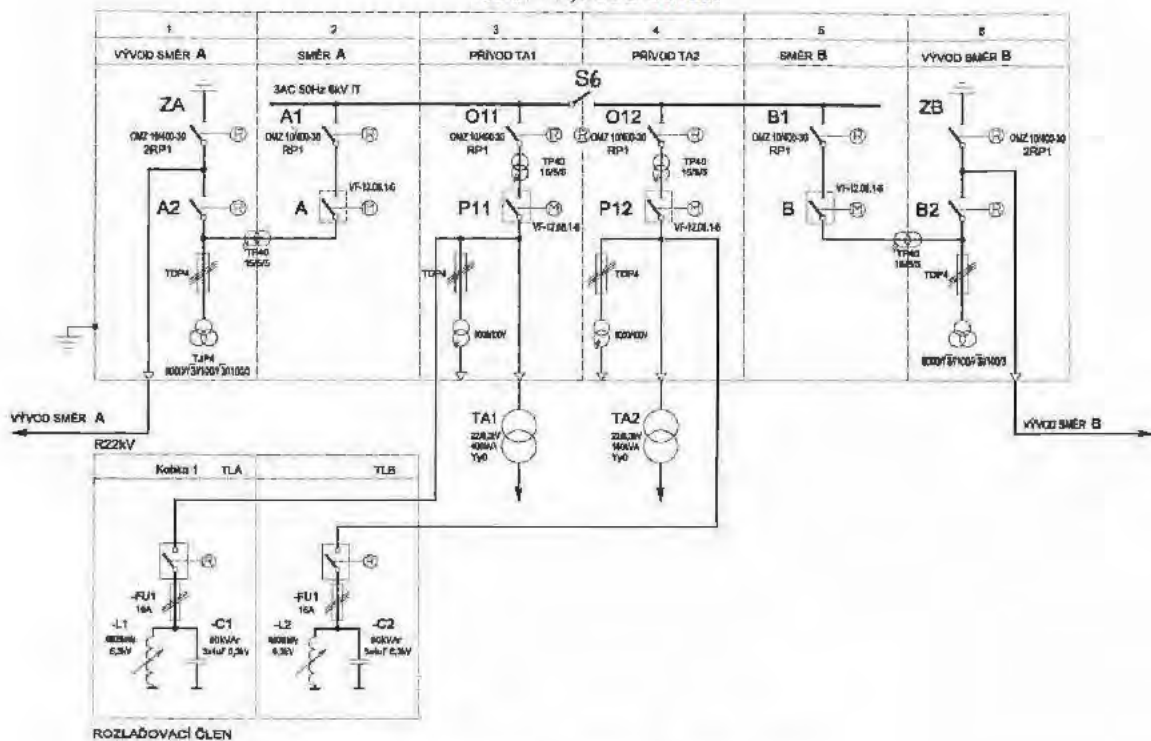
Obr. 31 Schéma TNS rozvodna 110 kV [26]

R 22 kV, 3AC 50 Hz



Obr. 32 Schéma TNS rozvodna 22 kV [26]

R 6 kV, 3AC 50 Hz



Obr. 33 Schéma TNS rozvodna 6 kV [26]



Obr. 36 Venkovní skříňové provedení suchého trakčního transformátoru ČKD [8]

3.4 Měniče

3.4.1 Rámové diodové měniče

Jedná se o diodové měniče v klasickém provedení na otevřeném rámu. Základním typem rámového provedení je šestipulzní měnič, sestavený z 12 diod (2 v sérii). Pro dvanáctipulzní spojení se používají dva rámy, lišící se vybavením. Konstrukce měniče umožňuje snadné propojení měničů pro dvanácti-pulzní spojení. Měniče jsou vybaveny RC členy pro omezení komutačních přepětí, přepětřovou ochranou na AC vstupu a obvody identifikace a signalizace průrazu diod. Základní provedení má instalováno rovněž svodič přepětí z DC strany a pomocný zatěžovací odpor pro omezení max. napětí při chodu bez zatížení. Vybavení měniče může být doplněno obvody dvoustupňové kontaktní signalizace teploty diod - výstrahy a havárie. Vstupní a výstupní moduly obvodů identifikace průrazu diod a signalizace teplot jsou propojeny pomocí optických kabelů, čímž je zajištěno bezpečné oddělení obvodů vn a nn, vyhovující požadavkům normy pro trakční měniče ČSN EN 50328 s vyšší hladinou zkušebního izolačního napětí.

3.4.2 Skříňové diodové měniče

Pro potřeby zapouzdřených skříňových DC rozváděčů, tvořených kompaktní sestavou trakčních měničů, napájecích vývodů a případně i podélných spojek jsou vyráběny zapouzdřené dvanáctipulzní měniče s výsuvnou částí. Jako příklad lze uvést skříňový měnič 28 UKTB-2x3M-01533 s proudovou hodnotou 1 500 A vyvinutý firmou ČKD Elektrotechnika ve spolupráci EŽ Praha. V konstrukčním provedení rozváděčů EŽ Praha má označení EZB-U. Dvanáctipulzní měnič je tvořen dvěma skříněmi, které obsahují prostorově oddělené vn a nn obvody. V zadní části skříně jsou silové obvody (pasy pro AC a DC propojení), přepětřová ochrana a motoricky ovládaný odpojovač výstupních kabelů trakčního napětí (v jedné skříně odpojovač plus pólu a v druhé odpojovač mínus pólu). Pro obě skříně je společný svodič přepětí na výstupu měniče a zatěžovací odpor pro omezení max. napětí při chodu bez zatížení. Při vysunutí vozíku dojde ve skříně automaticky k zakrytí kontaktů kontaktních nožů silového připojení. Výsuvná část (tzv. vozík) obsahuje kromě diodového bloku šestipulzního můstku (s dvěma diodami v sérii, chlazenými tepelnými trubicemi) také obvody identifikace průrazu diod pro každou dvojici samostatně a obvody dvoustupňové signalizace teploty diod.



Obr. 37 Dva pohledy na vozík skříňového měniče – zezadu jsou nahoře dobře viditelné chladiče diodového bloku a dole kontaktní hlavice silového přípojení [10]

Příklad skříňového usměrňovačového bloku EZB U 3 kV a jeho technické parametry:



Obr. 38 Skříňový usměrňovač EZB [11]

Tab. 3 Technické parametry usměrňovačového bloku EZB U 3 kV (EŽ Praha, a.s.)

Elektrické parametry	
Jmenovité napětí na vstupní straně měniče U_{LN}	2 500 V AC
Jmenovitý kmitočet na vstupní straně měniče f_n	50 Hz
Jmenovité trvalé usměrněné napětí U_{dN}	3 300 V
Nejvyšší trvalé usměrněné napětí U_{dM}	3 600 V
Nejvyšší krátkodobé usměrněné napětí U_{dM}	3 900 V
Jmenovitý trvalý usměrněný proud I_{dN}	1 500 A
Zkratová odolnost I_{pk} : - z jmenovitého zatížení - ze stavu bez zatížení	12 kA/10 ms 7,0 kA/100 ms 17 kA/10 ms 9,5 kA/100 ms
Zkratová odolnost ICM	15,3 kA
Ztráty při jmenovitém zatížení	10,04 kW
Přetížitelnost	150 % 2 hodiny, 200 % 1 min.
Chlazení	přirozené vzduchem
Krytí	IP 20/ shora IP 00
Silové zapojení měniče	2 × 3fázový můstek
Zvlnění výstupního stejnosměrného napětí	12pulsní
Počet diod ve větvi měniče zařazených v sérii	2 ks
Počet diod ve větvi měniče zařazených paralelně	1 ks
Napětí pomocných obvodů	110 V DC / 30 W max.

3.5 Rozváděče měření

Dnes nejrozšířenějším provedením TM je skříňové provedení. Přináší úsporu zastavěného prostoru a u rozváděčů ve výsuvném provedení i úsporu ve výzbroji vývodových polí z pohledu odpojovačů. Kromě rozváděčů části vn 22 kV zmíněných v kapitole 1.5 se v DC části 3 kV setkáme s rozváděči firem EŽ Praha, Microsys Brno, ČKD Elektrotechnika, ŽS Brno, ABB, Siemens. Modulární provedení těchto rozváděčů umožňuje širokou variabilitu provedení pro každý konkrétní případ. Příklad skříňového provedení TM je uveden na obr. 39. Jedná se o rozváděč EZB 3 kV DC výrobce EŽ Praha a.s. koncipovaný podle EN 50123-1 ed.2. Skládá se z jednotlivých polí vybraných z pěti základních modulů.

Jednotlivé moduly obsahují:

- modul EZB - N – skříň s rychlo vypínačem ve výsuvném provedení,
- modul EZB - S – skříň s odpojovačem pro podélné dělení přípojnice,
- modul EZB - SB – skříň s propojkami přípojnice (vývody směrem dolů),
- modul EZB - P – skříň s přívodním odpojovačem,
- modul EZB - V – skříň s propojkami přípojnice (vývody směrem nahoru).

Skříňové provedení usměrňovačů EZB – U, kapitola 3.4, pak umožňuje vytvoření kompaktní sestavy celé DC rozvodny.

Obdobné je provedení a uspořádání skříňových rozváděčů i ostatních výrobců a dodavatelů. Za zmínku stojí univerzálnost provedení rozváděčových skříní, která umožňuje osazení prvky různých výrobců bez větších úprav, například v ČR nejčastěji používaných rychlo vypínačů N3 Rapid (MEP Postřelmov) nebo UR36 (Sécheron).



Obr. 39 Skříňový rozváděč EZB [11]

3.6 Odpojovače, odpínače a výkonové vypínače

Použití a funkce jednotlivých prvků se neliší od ostatních dříve zmíněných napájecích soustav. Rovněž tak výrobci a dodavatelé ve většině případů poskytují tyto prvky pro všechny používané napěťové hladiny napájecích soustav DC.

3.6.1 Odpojovače

- Vnitřní odpojovače

Odpojovače umístěné ve vývodových polích měřiren a dále jako bezpečnostní prvky v rozvodnách všech napěťových úrovní pro viditelné odpojení zařízení (zpravidla před a za výkonovými vypínači).

Používané typy:

OCD; U_n 38,5 kV; I_n 400 až 1 600 A; SEZ Kropachy,

OCDZ – s uzemňovačem,

QAK; U_n 1,2 až 36 kV (72 kV); I_n 0,4 až 160 kA; f_n 50 Hz (16,7 až 400 Hz; DC); IVEP, a.s.,

QAKZ – s uzemňovačem.

- Venkovní trakční odpojovače

Odpojovače umístěné mimo měřírnu, určené pro bezpečné odpojení trolejového vedení od napájecích kabelů a pro možnost jeho rekonfigurace.

Používané typy:

OMD a OZT; SEZ Kropachy,

OMDZ a OZTZ – s uzemňovačem,

ODP TP3; MEP Postřelmov,

OZTZI – s uzemňovačem,

QAD 3 – U_n 3 kV DC; I_n 2 500, 3 000, 4 000, 4 500 A; IVEP, a.s. Brno,

QADZ 3 – s uzemňovačem.



Obr. 40 Odpojovač QAK vnitřní provedení [27]



Obr. 41 Odpojovač QAD venkovní provedení [27]

3.6.2 Odpínače

V trakční části rozvodny se s nimi prakticky nesetkáme. Používají se pro méně důležité a zřídka vypínané obvody. U měřiren např. pro vypínání transformátorů vlastní spotřeby. V sérii s odpínačem jsou instalovány pojistky, které působí při výskytu nadproudu vyšším než je jmenovitý vypínací výkon odpínače.

3.6.3 Výkonové vypínače

3pólové vypínače pro rozvodny vvn a vn:

vakuové VD4 - ABB, 3AH - Siemens,

plynové SF6 typ AP1/2 - Siemens,

maloolajové VMM 110 kV - Škoda Plzeň.

3.6.4 Rychlo vypínače

1pólové pro DC obvody:

N3 RAPID - MEP Postřelmov

UR26.64, UR36.64, U40.64 (liší se velikostí hodnoty jmenovitého tepelného proudu) - Sécheron

3.7 Ochrany

Osazení ochran bylo podrobněji rozepsáno v kapitole 1.7. Pro soustavu DC 3 kV je v podstatě shodné. V principu se vždy jedná o ochranu zařízení při zkratu a přetížení a o ochranu proti přepětí. Základními požadavky na nastavení ochran jsou bezpečnost a maximální spolehlivost. Selektivní nastavení jednotlivých ochran má zajistit odepnutí pouze nejnütnější části zařízení, která je poruchou přímo postižena. Měnitelné jsou dnes osazovány novými typy inteligentních ochranných jednotek umožňujících nastavení různých ochranných funkcí a zároveň vzájemnou komunikaci ochran mezi sebou, jakož i dálkový přenos těchto informací na řídicí pracoviště. Rozšířené jsou především ochrany ABB typu SPA (J, D,...) a nové IED REF a ochrany firmy Siemens. Pro měření napětí a proudů se standardně používají na všech napětových úrovních AC měřicí transformátory MTU a MTP. Pro měření proudu v DC části se používají tzv. přesytky firmy LEM - HAZ 4000-SBI.

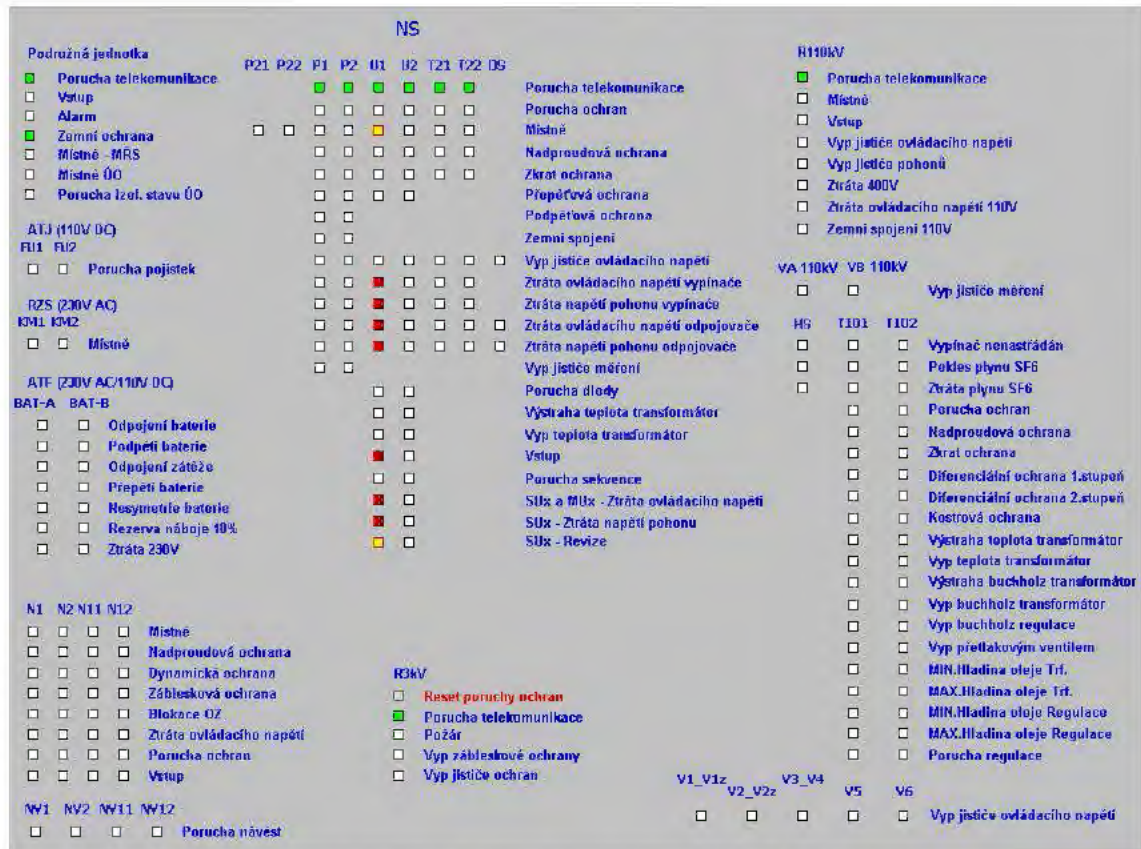
V souvislosti s ochranami je třeba se zmínit o jistém specifiku, které souvisí se způsobem provozu trakční soustavy DC 3 kV, a tím je tzv. vzájemná vazba napájecích rychlo vypínačů.

3.7.1 Vzájemná vazba napájecích rychlo vypínačů

Vzhledem ke způsobu provozu trakční sítě jako oboustranně napájené je třeba zajistit vzájemnou vazbu mezi rychlo vypínači ve vývodech napájecích stejný traťový úsek. Princip spočívá v samočinném vypnutí rychlo vypínače v protilehlé měnící, dojde-li v první TM k vypnutí rychlo vypínače působením ochran. Nastavení nadproudové ochrany rychlo vypínačů se pak provádí podle zkratového proudu za polovinou délky celého napájeného úseku. Při zkratu v libovolném místě tohoto úseku tedy vypínají oba rychlo vypínače v pořadí: bližší zkratu, a následně sousední vypínač na základě vzájemné vazby.

3.7.2 Poruchová hlášení od ochran a zabezpečení

Ukázka poruchového panelu TM v řídicím dispečerském systému ČD je na obr. 42. V levém sloupci vidíme poruchové hlášky a stavy za rozvodnu jako celek, tj. poruchy vlastní spotřeby a záložního napájení, dole pak poruchy napájecích a rozvodny 3 kV, uprostřed jsou poruchová hlášení z části 22 kV a v pravém sloupci poruchy z rozvodny 110 kV [28].



Obr. 42 Ukázka zobrazení panelu poruch TM v ŘS ČD [8]

Kontrolní otázky:

- 3.1 Jaké jsou výhody a nevýhody soustavy DC 3 kV ?
- 3.2 Jaké je základní schéma napájení soustavou DC 3 kV ?
- 3.3 Jaké jsou základní prvky a jejich funkce u soustavy DC 3 kV ?



4 SOUSTAVA AC 15 kV 16,7 Hz



Klíčová slova:

Charakteristika soustavy, schéma soustavy, trakční transformátor, měnič, rozváděč transformovny, odpojovač, odpínač, výkonový vypínač, ochrana.



Cíl studia:

Seznámení studenta s trakční napájecí soustavou AC 15 kV 16,7 Hz, její charakteristikou a využitím včetně příkladů a popisu základních technologických prvků používaných u této soustavy.



4.1 Charakteristika soustavy a využití

Vznik této soustavy byl vyvolán požadavkem na zvýšení napájecího napětí a použití AC proudu pro elektrickou trakci. Snížení frekvence bylo nezbytné pro zlepšení komutace používaných jednofázových komutátorových trakčních motorů. K hodnotě frekvence 16,7 Hz vedly technické důvody. K nim patří především možnosti transformace (tj. použití běžných transformátorů pouze s hmotnějším magnetickým obvodem) a tehdejší možnosti úpravy běžného síťového kmitočtu 50 Hz na nižší kmitočet. Frekvence 16,7 Hz byla snadno realizovatelná pomocí rotačních měničů na bázi šestipólového synchronního motoru a dvoupólového alternátoru, neboť se jedná právě o 1/3 síťového kmitočtu. Tento snížený kmitočet se zároveň ukázal jako vyhovující pro napájení komutátorových motorů trakčních vozidel. Nižší kmitočet se také příznivě projevil ve snížení impedance trakčního vedení a spolu s použitím dostatečně vysokého napětí napomohl ke snížení počtu napájecích stanic. Frekvence 16,7 Hz však s sebou přinesla i nevýhodu v podobě nutnosti budovat speciální jednofázové elektrárny určené pouze pro napájení trakce, příp. do běžných elektráren pro distribuční rozvody umístit další soustrojí pro trakční síť, nebo instalovat rotační měniče (dříve) nebo polovodičové měniče z běžné síťové frekvence 50 Hz na výrobu trakčního napětí o frekvenci 16,7 Hz a napětí 15 kV. Trakční soustava 16,7 Hz má vlastní jednofázové přenosové vedení vysokého napětí, nezávislé na třífázové rozvodné síti. Díky tomu je rekuperace energie v této síti bezproblémová. Celá soustava je propojená, odpadají proto problémy s neutrálními poli při střídání fází a je zde téměř stoprocentní jistota odebrání rekuperované energie.

Výhody:

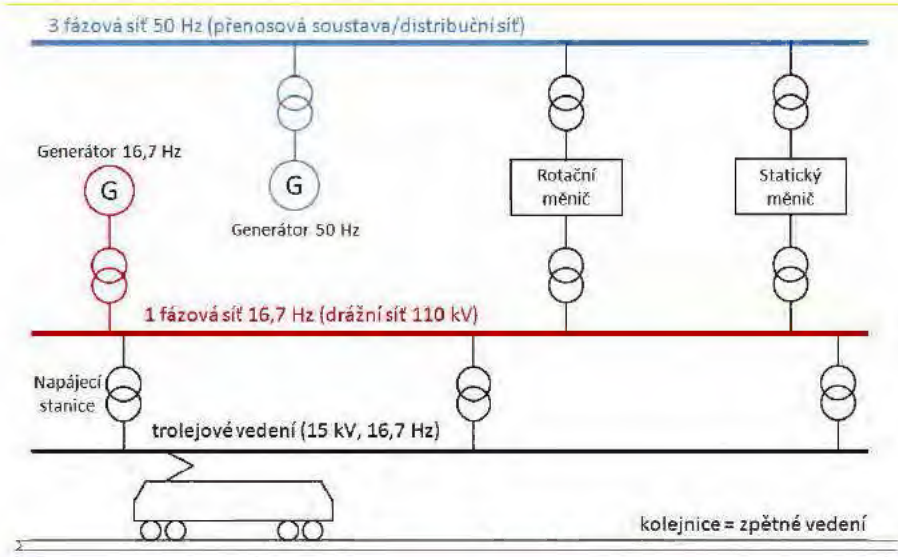
- vyšší napětí umožňuje přenášet větší výkon (menší průřez trolejového vedení, větší vzdálenost TNS),
- menší ztráty ve vedení (poměrně nízká impedance vedení), vzdálenost mezi TNS 40 až 60 km,
- možnost dvoustranného napájení (nedochází ke změnám fáze),
- nezávislost na celostátní energetické síti (samostatné vedení, vlastní zdroje),
- bezproblémová rekuperace.

Nevýhody:

- omezený trakční výkon celé napájecí soustavy
- nutnost budovat zvláštní vysokonapěťovou soustavu nebo stanice s měniči frekvence

Využití:

Napájecí soustava AC 15 kV 16,7 Hz je rozšířena pro napájení železničních drah především v Německu, Rakousku, Švýcarsku, Švédsku a Norsku. V ČR se dodnes můžeme setkat s touto soustavou na trati Znojmo – Šatov – (Retz), která je napájena z Rakouska. Mimo to disponuje tímto napájecím napětím Zkušební centrum Velim na svém zkušebním okruhu.

4.2 Schéma soustavy

Obr. 43 Schéma napájecí soustavy AC 15 kV 16,7 Hz [8]

4.3 Trakční transformátory

Jednofázové transformátory s převodem vvn/15 kV 16,7 Hz. Napětíová hladina vlastní drážní sítě vvn v Německu má hodnotu 110 kV. Výrobci: AEG, Alstom, ABB, SGB ad.

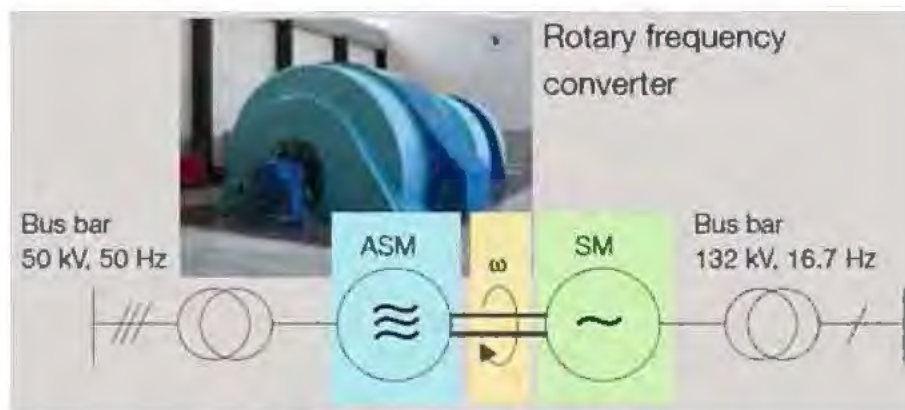


Obr. 44 Trakční transformátor 15 MW, 120/17,25 kV typ hermetik pro Deutsche Bahn [17]

4.4 Měníče

4.4.1 Rotační měniče

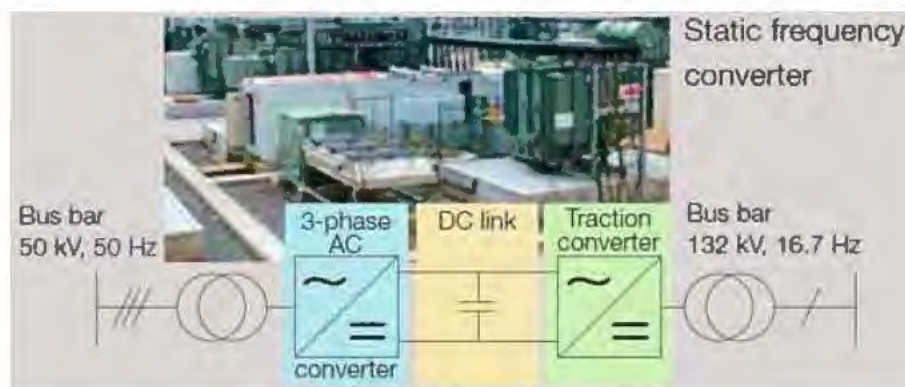
Rotační měniče se používají od počátku vzniku soustavy 16,7 Hz. Jedná se v podstatě o soustrojí šestipólového synchronního motoru a dvoupólového alternátoru. Tím je zajištěna změna frekvence v poměru 3:1, tedy z 50 Hz na 16,7 Hz.



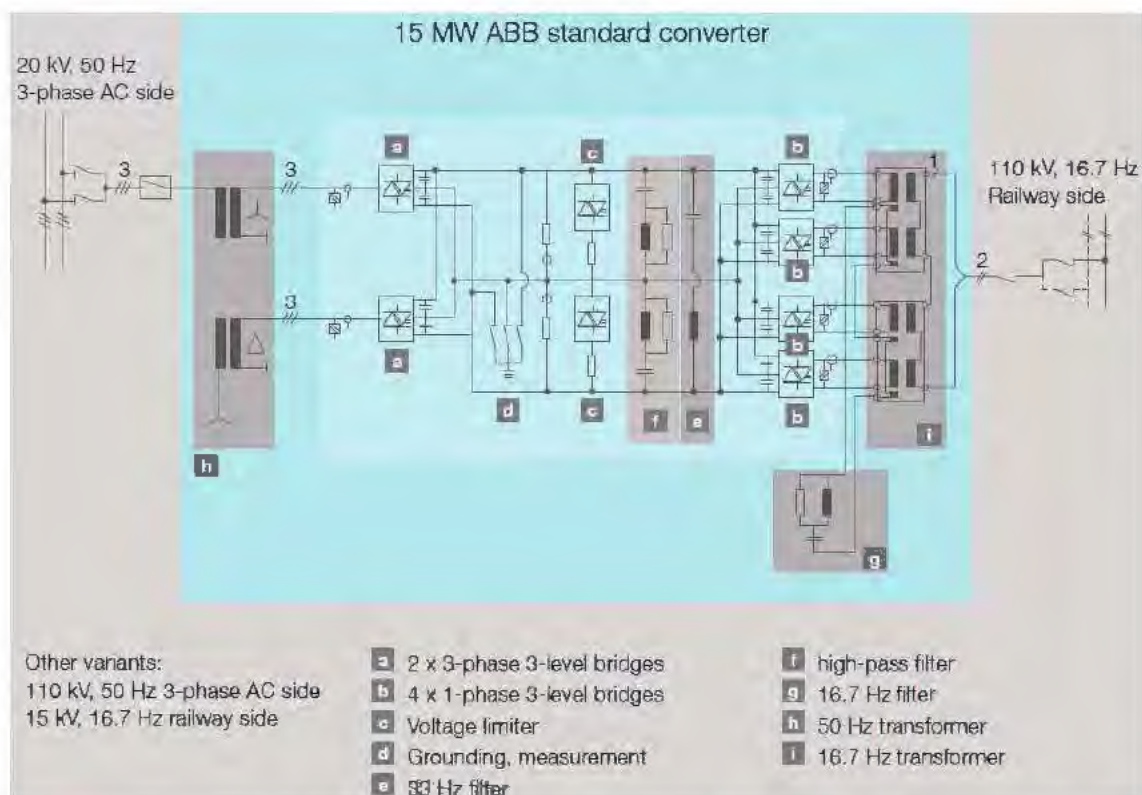
Obr. 45 Rotační frekvenční měnič [29]

4.4.2 Statické měniče

Statické polovodičové frekvenční měniče jsou konstruovány na bázi IGCT nebo GTO tyristorů. Blokové schéma standardního měniče 3AC 50 Hz / 2AC 16,7 Hz firmy ABB znázorňuje obr. 46.



Obr. 46 Statický frekvenční měnič [29]



Obr. 47 Schéma statického měniče 3AC 50 Hz/1AC 16,7 Hz [29]

Příkladem prakticky použitých trakčních frekvenčních měničů jsou:

- **Trakční frekvenční měnič PSC 6000 Rail (ABB)** – jedná se o vysokonapěťový (vn a vvn) statický frekvenční měnič, který umožňuje propojení veřejné třífázové sítě s jednofázovými trakčními sítěmi 16,7 Hz nebo 25 Hz.

Tab. 4 Technické parametry PSC 600 Rail (ABB)

Technické parametry	
Instalace	vnitřní / venkovní
Jmenovité napětí	15... 220 kV
Jmenovitý výkon	10... 120 MVA / jednotka
Jmenovitá vstupní frekvence	50 / 60 Hz
Jmenovitá výstupní frekvence	16,7 / 25 Hz
Okolní teplota	-25 ... 40°C

Tento měnič je použit např. v TM 2 x 30 MW, 3AC 110 kV 50 Hz / 2AC 110 kV 16,7 Hz Timelkam v Rakousku.



Obr. 48 Trakční frekvenční měnič PSC 6000 Rail (ABB) [30]

- Trakční frekvenční měnič Sitras FSC plus (Siemens)

Tab. 5 Technické parametry Sitras FSC plus (Siemens)

Technické parametry	
Jmenovitý výkon	12... 120MW
3-fázové připojení	
Vstupní napětí	≥ 10 kV
Jmenovitá vstupní frekvence	50 / 60 Hz
1-fázové připojení	
Výstupní napětí	12... 138 kV
Jmenovitá výstupní frekvence	16,7 / 25 / 50 / 60 Hz

Trakční frekvenční měnič Sitras FSC plus je použit např. pro napájení trakční sítě AC 110 kV 16,7 Hz z rozvodny 3AC 110 kV 50 Hz elektrárny Franken I v Norimberku.



Obr. 49 TM pro napájení trakční sítě 16,7 Hz (Norimberk) [31]

4.5 Rozváděče transformoven

Rozváděče trakční transformovny mohou být ve venkovním nebo vnitřním provedení. Vnitřní provedení rozváděče skříňového typu je podobné jako u napájecí soustavy AC 25 kV 50 Hz používané v ČR. Jedná se o kovově krytá vzduchem izolovaná rozváděčová pole (skříně), s různou vyzbrojí:

- přívodní pole,
- napáječové pole,
- vývod pro filtračně kompenzační zařízení (FKZ),
- pole pro odpojení transformátoru vlastní spotřeby,
- spojka hlavní přípojnice (pole bez vypínače s odpojovačem),
- pole s transformátorem vlastní spotřeby,
- pole měniče – kompenzačního filtru.

Stavebnicová konstrukce skříňového rozváděče umožňuje skládat rozváděč z typových polí dle konkrétních požadavků provozovatele.

Jedním z výrobců v ČR skříňových vn rozváděčů určených pro rozvod střídavého proudu v trakčních napájecích a spínacích stanicích soustavy 1PEN 16,7 Hz, 17,5 kV/TN-C je např. EŽ Praha a.s.

4.6 Odpojovače, odpínače a výkonové vypínače

Používají se spínací prvky standardního provedení pro dané napěťové hladiny vyhovující jmenovitému kmitočtu 50/60 Hz i 16,7 Hz. Pro jednofázový rozvod jsou tyto prvky dodávány v jednopólovém nebo dvoupólovém provedení. Mezi významné dodavatele a výrobce patří firmy Siemens, ABB, Alstom, apod.

4.7 Ochrany

Použití ochran ve vývodech a pro transformátory je v souladu s příslušnými státními a evropskými normami a národními zvyklostmi. Na území ČR se tato soustava vyskytuje pouze na trati Znojmo-Šatov a na zkušebním okruhu VÚŽ Velim, kde jsou použity ochrany v souladu s ČSN 33 3051 a ČSN 34 1500. Podrobněji se použitím ochran v napájecích stanicích jednofázové soustavy AC zabývá kapitola 2.6. pro soustavu AC 25 kV 50 Hz.

Kontrolní otázky:

- 4.1 Jaké jsou výhody a nevýhody soustavy AC 15 kV 16,7 Hz ?
- 4.2 Jaké je základní schéma napájení soustavou AC 15 kV 16,7 Hz ?
- 4.3 Jaké jsou základní prvky a jejich funkce u soustavy AC 15 kV 16,7 Hz ?



5 SOUSTAVA AC 25 kV 50 Hz



Klíčová slova:

Charakteristika soustavy, schéma soustavy, trakční transformátor, rozváděč transformovny, odpojovač, odpínač, výkonový vypínač, ochrana.



Cíl studia:

Seznámení studenta s trakční napájecí soustavou AC 25 kV 50 Hz, její charakteristikou a využitím včetně příkladů a popisu základních technologických prvků používaných u této soustavy.



5.1 Charakteristika soustavy a využití

Jedná se o AC jednofázovou napájecí soustavu pro železniční dopravu, rozšířenou především ve Francii, Belgii, Velké Británii, Portugalsku, Finsku, Dánsku, Maďarsku, Rumunsku, Bulharsku, Řecku, zemích bývalé Jugoslávie, Slovensku a v České republice. V ČR představuje v současnosti cca 42 % elektrizovaných tratí a pokrývá jižní část území, obr. 50 a obr. 51.

Na rozdíl od DC trakce je AC trakce provozována výhradně jako paprsková. Oboustranné napájení není možné z důvodu nežádoucích přetoků vyrovnávacích proudů mezi napájecími stanicemi. Z každé napájecí stanice - trakční transformovny je napájeno trakční vedení až po spínací stanici, která umožňuje napájený úsek prodloužit v případě poruchy nebo výluky jedné ze sousedních TT [22]. Napájecí stanice má vždy pro každou kolej v každém směru samostatný vývod. Ve spínací stanici jsou obě stopy v jednom směru obvykle příčně propojeny pro zmenšení úbytků napětí [2, 3, 23, 24].

Výhody:

- malé ztráty v trolejovém vedení vzhledem k soustavám nižších napěťových hladin,
- možnost použití menších průřezů trolejového vedení,
- větší vzdálenost mezi napájecími stanicemi (vzdálenost TT v rozmezí 40 až 60 km)
- jednodušší provedení napájecích stanic proti TNS soustavě DC

Nevýhody:

- nesymetrické zatížení trojfázové distribuční napájecí soustavy dodavatele,
- nedořešená problematika rekuperace ve vztahu k dodavateli energie (V ČR do roku 2008 rekuperace zakázána, v současnosti ve stádiu zkušebního provozu),
- použití filtračně kompenzačního zařízení (FKZ) pro dodržení požadavků distributora v oblasti odebírané energie. (Požadovaná hodnota účinníku je 0,95 až 1, indukčního charakteru. Dále je třeba omezit deformaci časového průběhu odebíraného proudu vlivem vyšších harmonických, které generují především hnací vozidla starší konstrukce.)

5.1.1 Rekuperace

Obecně je rekuperace v ČR z trakční sítě od distribuční napájecí soustavy zakázána. U soustavy AC 25 kV 50 Hz je tento požadavek řešen použitím zpětných wattových ochran

v TNS, které způsobí odepnutí stanice od distribuční sítě v případě toku proudu směrem do distribuční sítě. Zajištění současného odběru elektrické energie v úseku s rekuperujícím vozidlem tak, aby k tomuto přetoku nedošlo je problematické a vzniká tedy riziko nežádoucího vypnutí celé TNS.

S účinností od 1.11.2008 platí Pokyn generálního ředitele SŽDC č. 14/2008 (ve znění změn č. 1 až 5 s účinností od 20.1.2014) [32], jehož předmětem je zavedení zkušebního provozu rekuperace elektrických hnacích vozidel (EHV) ve vybraných traťových úsecích elektrizovaných jednofázovou trakční proudovou soustavou AC 25 kV 50 Hz. V těchto úsecích je blokovácí funkce zpětných wattových relé odstavena. Provoz se řídí zvláštními ustanoveními.

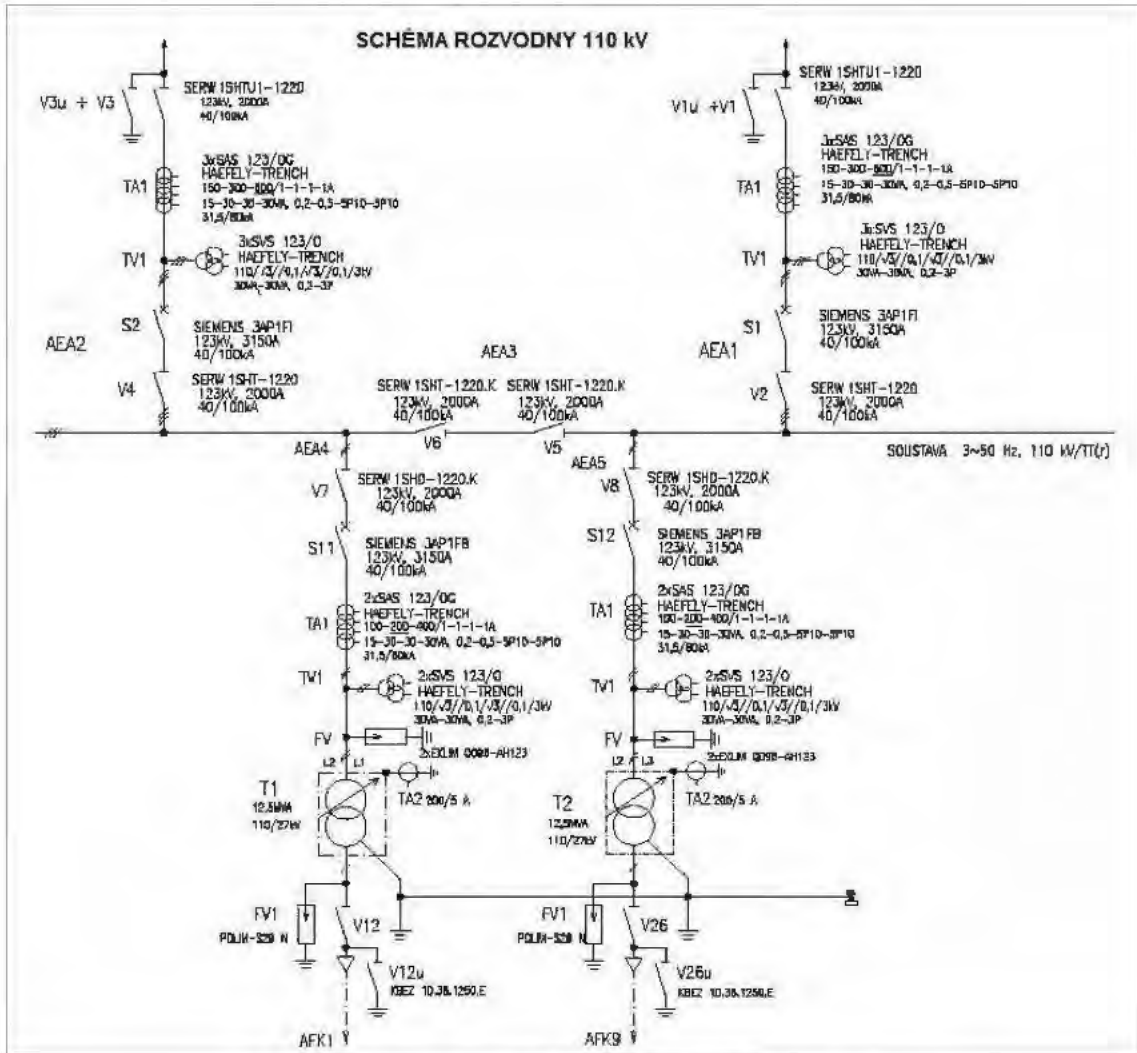
5.2 Schéma soustavy

Napájecí soustava v sobě zahrnuje trakční napájecí stanice (TNS) tzv. trakční transformovny (TT), spínací stanice, distribuční stanice, napájecí a trolejové vedení. Součástí soustavy je rovněž vedení pro zpětný trakční proud.

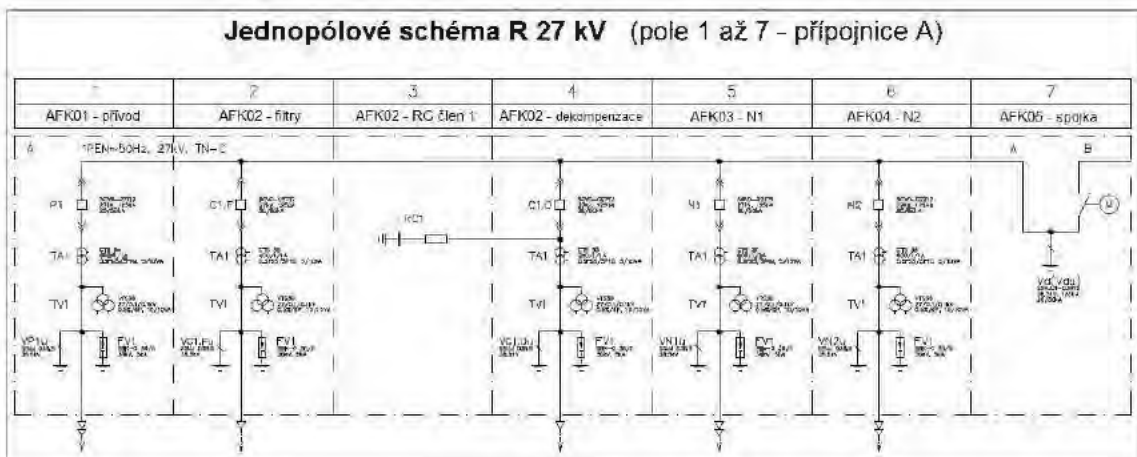


5.2.1 Trakční transformovna

- Rozvodna vvn, u ČD doposud výhradně 110 kV (obr. 50),
- stanoviště s 1-fázovými transformátory vvn/27 kV,
- jednofázová rozvodna 27 kV (obr. 51),
- filtračně - kompenzační zařízení (obr. 53), případně filtrační - kompenzační - symetrizační zařízení,
- systém kontroly a řízení,
- vlastní spotřeba,
- kabelové rozvody, v odpovídajícím rozsahu jsou součástí každého uvedeného podsystemu,
- vnější uzemnění,
- případná prostorová rezerva pro napájecí transformovnu 6 kV 50 Hz.



Obr. 50 Schéma rozvodny 110 kV (zapojení „H“) [26]



Obr. 51 Schéma části rozvodny 27 kV [26]

5.2.2 Spínací stanice

Spínací stanice jsou obecně zřizovány pro:

- zvýšení spolehlivosti napájení elektrizovaných tratí,
- zvýšení výkonosti pevných elektrických trakčních zařízení,

- zvýšení propustnosti elektrizovaných tratí.

Vícevypínačové spínací stanice musí umožňovat:

- jednostranné napájení trakčního vedení z přilehlých TNS,
- dvoustranné napájení trakčního vedení při paralelní spolupráci přilehlých TNS,
- podélné propojení obou stop trakčního vedení při přerušeném napájení z jedné TNS,
- příčné propojení obou stop trakčního vedení.

U napájecí soustavy AC 25 kV 50 Hz musí ochrany vícevypínačové spínací stanice splňovat následující podmínky:

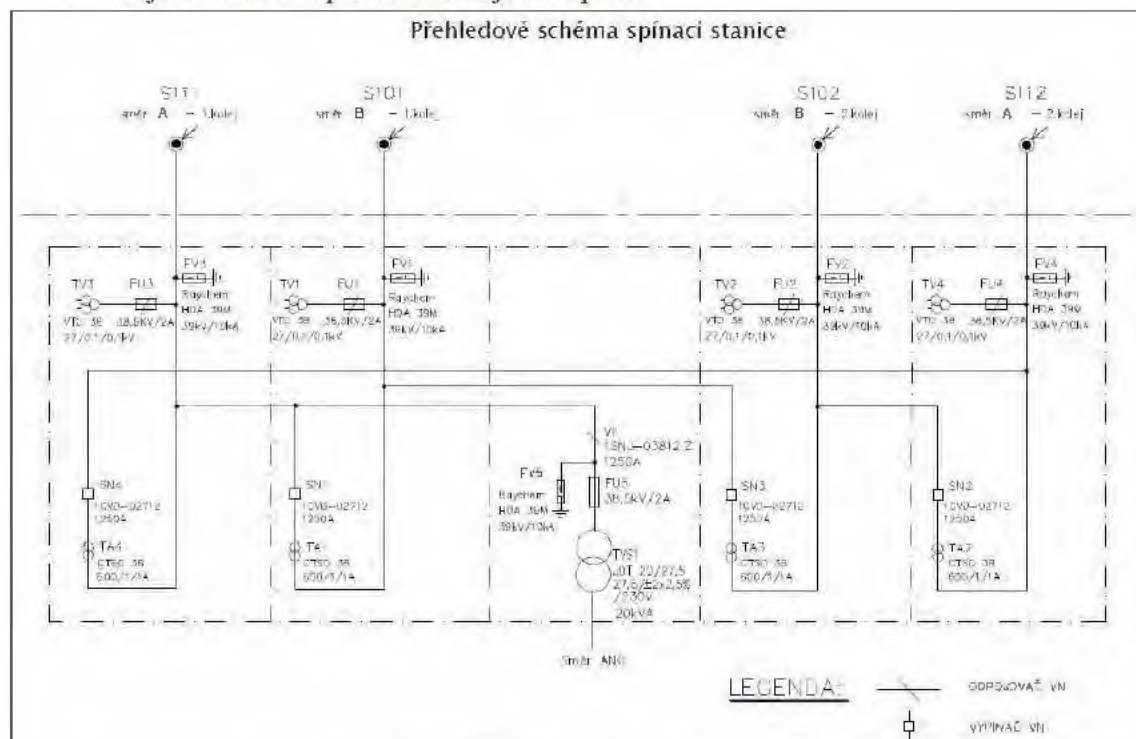
- znemožnit propojení obou přilehlých TT,
- odepnout selektivně vadný úsek,
- znemožnit samočinné vypnutí vypínače podpěřovou ochranou, pokud napětí ve spínací stanici neklesne pod 17,5 kV.

Jednovypínačové spínací stanice

Jednovypínačové spínací stanice slouží k příčnému propojení obou stop trakčního vedení, nebo k podélnému propojení jedné stopy děleného vedení. Spínací stanice pro podélné spínání jedné stopy TV na jednokolejných tratích musí znemožnit propojení obou přilehlých TT.

Spínací stanice AC 25 kV 50 Hz

- Jednopolová rozvodna 25 kV 50 Hz (obr. 52),
- systém kontroly a řízení,
- vlastní spotřeba,
- kabelové rozvody, v odpovídajícím rozsahu jsou součástí každého uvedeného podsystemu,
- vnější uzemnění a přivedení kolejového pólu.



Obr. 52 Schéma spínací stanice AC 25 kV 50 Hz [26]

5.2.3 Filtračně-kompenzační zařízení [33]

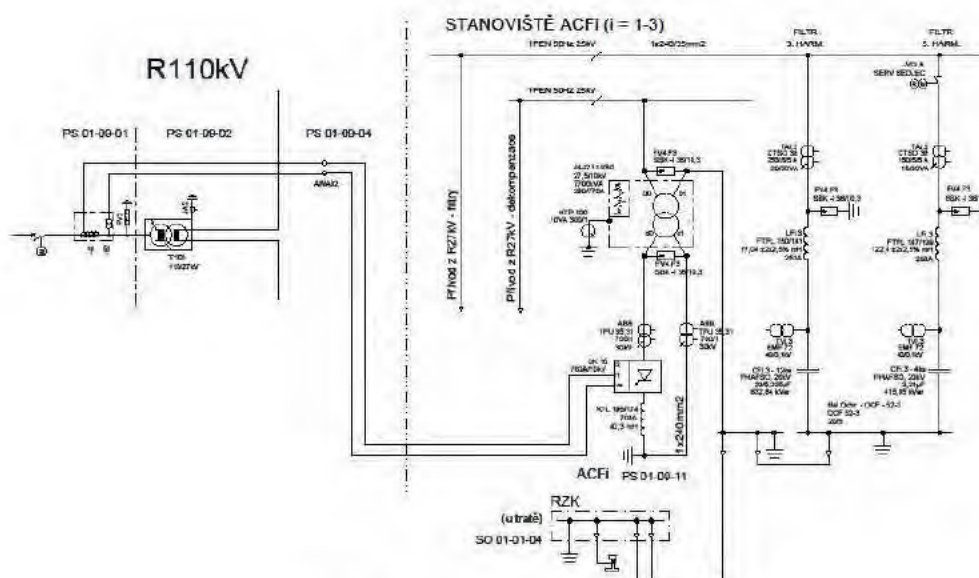
FKZ kompenzují zpětné negativní vlivy spotřebičů na napájecí síť. Tyto vlivy představují:

- odběr, resp. dodávka jalové energie,
- deformace napěťové křivky vlivem vyšších harmonických složek proudu,
- nesymetrie zátěže.

FKZ zajišťuje:

- plynulé a rychlé řízení jalového výkonu,
- filtrace vyšších harmonických složek,
- možnost individuálního řízení každé fáze zvláště při požadavku odstranění nesymetrie sítě.

FKZ zajišťují optimalizaci odběru elektrické energie pomocí dynamických kompenzátorů. Filtry, tvořené sériovou kombinací kondenzátoru a filtrační tlumivky, slouží jako sériové rezonanční obvody pro "odsávání" nežádoucích vyšších harmonických kmitočtů, t.j. 3., 5., 7., atd. a současně dodávají do sítě konstantní kapacitní proud. Tento kapacitní proud je kompenzován při nezátěžené síti dekompenzačním členem (kompenzátozem) s řízením proudu měničem v dekompenzační tlumivce. Klíčovou součástí měniče je optotyristor zajišťující galvanické oddělení hradla světelným vláknem. Současné parametry těchto optotyristorů umožňují konstruovat měniče na plné napětí soustavy 25 kV. Z dosud realizovaných konstrukcí vyplývá možnost dosažení středního proudu spínače při kvalitním chlazení součástek na úrovni 700 A, tedy výkonu měniče nad 18 MVar. Díky tomu je možné nové beztransformátorové provedení kompenzačního zařízení s možností přímého připojení na síť 25 kV. Výrobce těchto zařízení je ČKD elektrotechnika. U ČD se však zatím používají varianty FKZ se snižovacím transformátorem na 3 kV, 5 kV, 6 kV a 10 kV s filtry naladěnými na 3. a 5. harmonickou s prostorovou rezervou pro 7. harmonickou, která v ČR nebývá využita. Dekompenzační člen pro regulaci účinnosti musí být dimenzovaný nejen na plnou kapacitu kondenzátorů ve filtrech, ale i na kapacitu nejdelšího možného napájeného úseku trakčního vedení z daného transformátoru. Každý trakční transformátor má své FKZ.



Obr. 53 Schéma zapojení FKZ [26]

5.3 Trakční transformátory

Trakční transformátory jsou jednofázové. Primární strana je připojena na dvě fáze třífázové distribuční sítě 110 kV. Sekundární strana je jedním pólem přizemněna a propojena s kolejničovým vedením a druhý pól je přes rozvodnu 27 kV připojen na trolejové vedení. Standardně jsou v napájecích stanicích dva transformátory, obvykle zapojené do „V“, tj. jedna fáze je společná pro oba transformátory a druhá je pro každý transformátor jiná. Tento typ zapojení je na obr. 55. Mezi konce napájené ze dvou různých trakčních transformátorů musí být v trakčním vedení vloženo elektrické dělení na sdružené napětí. Fáze musí být řazeny tak, aby bylo umožněno sepnutí sousedních TT. Jsou-li v TT instalovány dva trakční transformátory připojené na stejnou fázi je nutno vyloučit trvalý paralelní chod. Při přepínání transformátorů připojených na shodné fáze bez přerušení napájení trakčního vedení se připouští krátkodobý paralelní chod (do 12 s), ČSN 33 3505 ed.2.

5.3.1 Transformátory používané u ČD

Olejšové transformátory výrobce Škoda Plzeň (ETD) s převodem 110/27 kV, typ: EJRH28M-7 (dnes používaný nový typ transformátoru s Cu vinutím)

- jmenovitý výkon 12,5 MVA,
- jmenovitý převod naprázdno $110 \pm 8 \times 2 \% / 27$ kV,
- jmenovitý proud 113,6/463 A,
- kmitočet 50 Hz,
- chlazení ONAN.

Starší typy olejových transformátorů (postupně nahrazeny výše uvedeným typem):

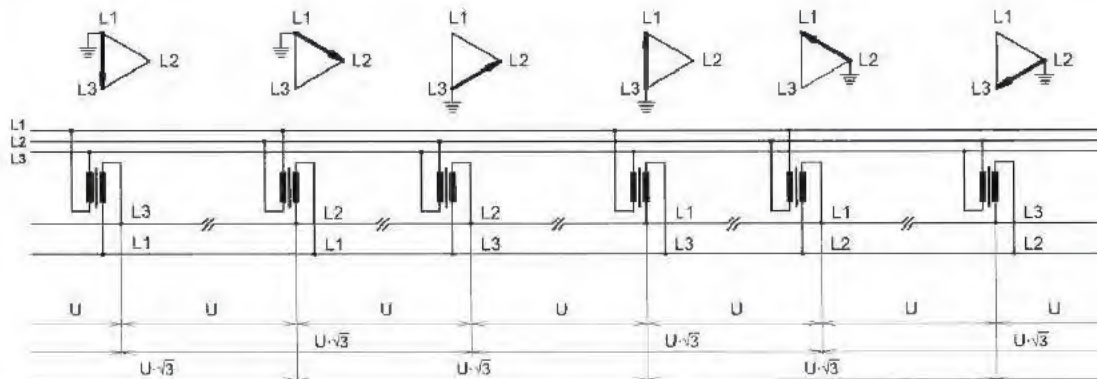
EJRH 6989/71

- trvalý výkon bez ofukování 6,5 MVA,
- jmenovitý výkon s trvalým ofukováním 8 MVA,
- jmenovitý převod naprázdno $110 \pm 8 \times 2 \% / 27$ kV,
- jmenovitý proud 72,5/296 A,
- kmitočet 50 Hz,
- chlazení ONAN/ONAF.

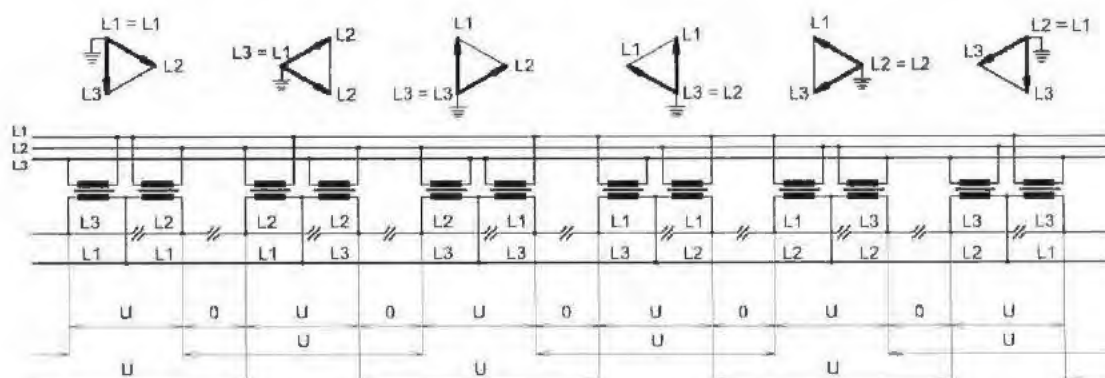
EJRE 7491/75

- trvalý výkon ofukování 10 MVA,
- jmenovitý výkon s trvalým ofukováním 13,3 MVA,
- jmenovitý převod naprázdno $110 \pm 8 \times 2 \% / 27$ kV,
- jmenovitý proud 121/492 A,
- kmitočet 50 Hz,
- chlazení ONAN/ONAF.

Způsoby zapojení vinutí trakčních transformátorů AC 110/27 kV a jejich připojování na energetickou síť AC 110 kV včetně připojování sledu jednotlivých fází k trakčnímu vedení AC 27 kV znázorňují obr. 54 a obr. 55. Na obr. 54 je primární strana transformátorů zapojena do „T“ a na obr. 55 do „V“. Způsob připojení trakčních transformátorů a spojení vinutí musí být dohodnuto mezi dodavatelem a odběratelem elektrické energie.



Obr. 54 Připojení trakčních transformátorů 110/27 kV na energetickou síť a trakční vedení při zapojení vstupního vinutí do „T“ [34]



Obr. 55 Připojení trakčních transformátorů 110/27 kV na energetickou síť a trakční vedení při zapojení vstupního vinutí do „V“ [34]

5.4 Rozváděče transformoven

Rozváděče trakční transformovny bývají ve venkovním nebo vnitřním provedení. U novějších rozvodů ve vnitřním (skříňovém) provedení, se nejčastěji používá rozváděč 25 kV AC typ SAxx* firmy OHL ŽS [35]. Dalším typem jsou rozváděče firmy EŽ Praha s označením EZB- AC určených pro rozvod střídavého proudu v trakčních napájecích a spínacích stanicích soustavy 1PEN 50 Hz 27 kV/TN-C. Rozvodny jsou jednosystémové s podélným dělením (obr. 51), standardem jsou výsuvné vozíky s vypínačem nebo s vypínačem a proudovým měničem (obr. 57). Pohled na sestavu rozváděče SAxx je na obr. 56. Kovově kryté rozváděče 25 kV 50 Hz AC typu SAxx sestávají ze čtyř základních typů:

- SANx - přívodové/vývodové pole - slouží k přivedení výkonu resp. k jištění, zapínání a vypínání jednotlivých úseku,
- SASx - pole podélného dělení - slouží k rozpojení dvou částí napájecí technologie,
- SATx - pole s transformátorem vlastní spotřeby,
- SACx - pole přímé kompenzace.

* Poznámka: symboly xx jsou použity pro upřesnění varianty provedení, a to (první x) písmenem pro rozlišení typu a (druhé x) číslicí v rozsahu 0 až 9 (např. varianta pro SpS nebo TNS, dle jmenovitých parametrů atd.).



Obr. 56 Skříňový rozváděč TT 27 kV [26]



Obr. 57 Detail přívodního pole skříňového rozváděče [26]

5.5 Odpojovače, odpínače a výkonové vypínače [36]

5.5.1 Rozvodna 110 kV

V rozvodně 110 kV se používají standardní prvky [28]. Ve vývodech pro transformátory však na rozdíl od distribučních třífázových rozveden postačí pouze dva póly (jednofázové transformátory). U zapouzdřených rozveden se z instalovaných třífázových prvků využijí pouze dvě fáze. Používají se vypínače 3AP1 FG, 123 kV (Siemens), třípólové odpojovače SERW 3SHT-1220 na přívodech a dvoupólové odpojovače 1SHD-1220 na vývodech pro trakční transformátory. Přístrojové transformátory proudu a napětí firmy Pfiffner. Často používanými jsou rovněž prvky firmy ABB.

5.5.2 Rozvodna 27 kV

Odpojovače

V ČR se používají především odpojovače výrobců SEZ Krompachy, SERW (typ 1SNJ-03812), IVEP, DRIBO aj. Příkladem je venkovní trakční odpojovač AC 35 kV typ QAD 35 (IVEP) určený pro montáž do jednofázových AC trakčních vedení a napájecích stanic (obr. 58). Rozšířenou variantou s uzemňovačem je odpojovač s typovým označením QADZ.

Odpínače

Odpínače se v rozvodnách nepoužívají. V poslední době se instalují na vývodech z napájecích stanic do trakčního vedení místo odpojovačů. Používané jsou odpínače IVEP, DRIBO, SEZ Krompachy. Jednopolový odpínač pro spínání vnějších vedení typ OJC-Ž je na obr. 59.



Obr. 58 Odpojovač QAD 35 [37]



Obr. 59 Odpínač OJC Ž [38]

Vypínače

Ve starších rozvodnách se stále ještě setkáváme s maloolejovými vypínači – typ VMI 744. V nových rozvodnách se používají výhradně vakuové vypínače – Siemens 3SH4784 nebo SERW 1CVD-02712. Jmenovitý proud vypínačů obvykle 1 250 A (příp. 1 600 A).



Obr. 60 Jednopolový vakuový vypínač vnitřní 27,5 kV – 5 CVD 02712 [39]



Obr. 61 Jednopolový vakuový vypínač venkovní 27,5 kV – 1 CVD 02712 [39]

5.6 Ochrany

Soustava ochran v trakčních napájecích a spínacích stanicích se obecně řídí zásadami ČSN 33 3051 a musí odpovídat ČSN 34 1500 ed. 2. Musí zajistit selektivní činnost při vypínání zkratů a přetížení jak při mimořádném zatížení, tak i při předpokládaných provozních stavech. Systém ochran proti zkratu a přetížení u trakčních transformoven musí respektovat nesinusový časový průběh proudu odebíraný z TT a SpS. Při zkratech na trakčním vedení musí vypínače odpojit vedení nejpozději do 0,6 s. Zkraty, vzdálené od TT do jedné pětiny až jedné čtvrtiny celkové délky mezi TT a SpS, musí být vypínány bez časového zpoždění ochrany.

5.6.1 Ochrany transformátorů

- nadproudová mžiková ochrana před účinky zkratů,
- nadproudová časově nezávislá ochrana proti přetížení,
- zemní kostrová ochrana před průrazem vinutí na kostru, případně rozdílová ochrana,
- zpětná wattová ochrana s možností blokování vypínací funkce,
- podpěťová ochrana ve funkci ochrany před zkratem na přípojnicích AC 27 kV,
- přepětíová ochrana,
- Buchholzovo plynové relé - signalizuje a vypíná transformátor při vzniku plynů v nádobě transformátoru,
- teploměr s automatickým spínáním ofuků (jsou-li),
- tepelná ochrana - zajistí vypnutí stroje při nadměrném oteplení vinutí transformátoru, aby nedošlo k jeho destrukci.

5.6.2 Doporučené ochrany ve vývodech

- nadproudová mžiková ochrana před účinky zkratů,
- nadproudová časově nezávislá ochrana před účinky vzdálených zkratů,
- distanční napáječová ochrana s vestavěným napěťovým a nadproudovým článkem, která nahrazuje dvě výše zmíněné nadproudové ochrany,
- automatika opětného zapínání (trvání beznapěťového stavu 15 s až 20 s),
- časový článek pro zabezpečení selektivity napáječkové distanční ochrany s ochranami v SpS,
- příp. další ochrany podle místních provozních podmínek – podpěťová, přepětíová, zpětná wattová (při povolené rekuperaci je vyřazena)

5.6.3 Typy ochran

Ve starších rozvodnách se stále vyskytují reléové ochrany typu: A, AT, D25, V, apod. V novějších jsou ochranné jednotky odpovídající době realizace – u ČD konkrétně ochrany ABB, od SPAJ, SPAU přes REF542 až k nyní používaným terminálům typu REL610 až REF630. Lze se samozřejmě setkat i s ochranami jiných výrobců. Pro ochrany kompenzátorů se používají např. ochrany firmy Protection & Consulting typu REFU.

Kontrolní otázky:

- 5.1 Jaké jsou výhody a nevýhody soustavy AC 25 kV 50 Hz ?
- 5.2 Jaké je základní schéma napájení soustavou AC 25 kV 50 Hz ?
- 5.3 Jaké jsou základní prvky a jejich funkce u soustavy AC 25 kV 50 Hz ?



6 SOUSTAVA 2AC 25 kV 50 Hz



Klíčová slova:

Charakteristika soustavy, schéma soustavy, trakční transformátor, rozváděč transformovny, odpojovač, odpínač, výkonový vypínač, ochrana.



Cíl studia:

Seznámení studenta s trakční napájecí soustavou 2AC 25 kV 50 Hz, její charakteristikou a využitím včetně příkladů a popisu základních technologických prvků používaných u této soustavy.



6.1 Charakteristika soustavy a využití

Rostoucí požadavky na dodávaný výkon hnacím vozidlům vedly k hledání nových řešení napájecích soustav. Omezení výkonu v elektrické železniční dopravě je obecně dáno přenosovými schopnostmi trakčního vedení. Výkon, který může soustava přenést, závisí především na impedanci vedení. Pro zvýšení přenosové schopnosti vedení je tedy třeba zvýšit napájecí napětí nebo snížit podélnou impedanci trakčního vedení. Oba tyto parametry splňuje napájecí soustava 2 AC 25 kV. Tato soustava spočívá v přivedení elektrické energie co nejbližší místu spotřeby dvou vodičovým vedením 50 kV a v jeho transformaci v místě spotřeby (v úseku, kde se nachází hnací vozidlo) pomocí autotransformátorů na hodnotu 25 kV mezi trolejovým vedením a kolejnici. Napájecí soustava se tedy skládá z běžného trolejového vedení, které představuje jeden pól, a přírodního napájecího vedení umístěného v souběhu s trolejovým vedením na trakčních podpěrách vně trati nebo nad trolejovým vedením, obr. 62. Toto vedení pak představuje druhý pól (proti napětí v trolejovém vedení je fázově posunuto o 180°). Oba vodiče mají mezi sebou napětí 50 kV. Střed sekundárního vinutí trakčního transformátoru je uzemněn a připojen na kolejnici. Trolejové vedení i druhý napájecí vodič mají proti kolejnici (zemi) napětí 25 kV, což je běžná hodnota napětí používaná pro napájení EHV. Nezbytnou součástí této soustavy jsou trakční autotransformátory umístěné v trakčním vedení a připojené mezi napájecí vodiče. Jejich střední bod vinutí je vyveden a spojen s kolejnicemi. Tato soustava je označována jako AT soustava, obr. 63 a obr. 64. Vzdálenost mezi napájecími stanicemi se pohybuje kolem 50 km. Autotransformátory se instalují ve vzdálenostech 10 až 12 km. Koncepčně jinak řešená je BT soustava, která nepoužívá autotransformátory, ale tzv. booster transformátory zapojené podle obr. 65.

Výhody:

- Nízký úbytek napětí v nadzemním trolejovém vedení.
- Nižší ztráty ve vedení, tedy úspora energie.
- Soustava umožňuje zvětšit vzdálenosti mezi napájecími stanicemi.
- V úsecích, kde se nenachází EHV, neprochází kolejnici ani zemí zpětný trakční proud. Tento proud se uzavírá pouze v úseku mezi EHV a nejbližšími autotransformátory. To ve své podstatě vede k omezení rušivých vlivů z pohledu EMC a nepříznivých korozních účinků na ostatní podzemní zařízení.
- Výhoda AT soustavy oproti BT je v počtu podpůrných transformátorů. Vzdálenost mezi autotransformátory je cca 10 km, zatímco booster transformátory je třeba instalovat po 3 km.

Nevýhody:

- Větší počet vodičů nadzemního trolejového vedení.
- Složitější napájecí stanice, větší množství technologických prvků (spínacích přístrojů apod.)
- Nutnost použití trakčních autotransformátorů (booster transformátorů). Představují ztráty v napájecí soustavě a další náklady.
- Riziko vyšších lokálních zemních proudů při vyšších napěťových hladinách.

Obr. 62 Nadzemní vedení 2×25 kV [25]**Využití:**

2 AC 25 kV se využívá především pro napájení drah rychlovlaků a vysokokapacitních tratí. Plán vysokorychlostních tratí pro rok 2015 v rámci EU je uveden v příloze A. Příkladem je:

- Japonsko, Sanyo Shinkansen (25/25 kV – 60 Hz),
- Francie, TGV Paříž-Lyon (25/25 kV – 50 Hz),
- Španělsko, rychlovlak s výjimkou tratě Madrid-Sevilla,
- Itálie, Řím-Florence,
- Maďarsko, zjednodušená AT soustava (25/25 kV – 50 Hz),
- Jižní Korea.

Se soustavou AT na nižší napěťové hladině se můžeme setkat např. ve Švédsku na trati Kiruna – Svappavaara, kde je použito napětí 15/15 kV – 16,7 Hz.

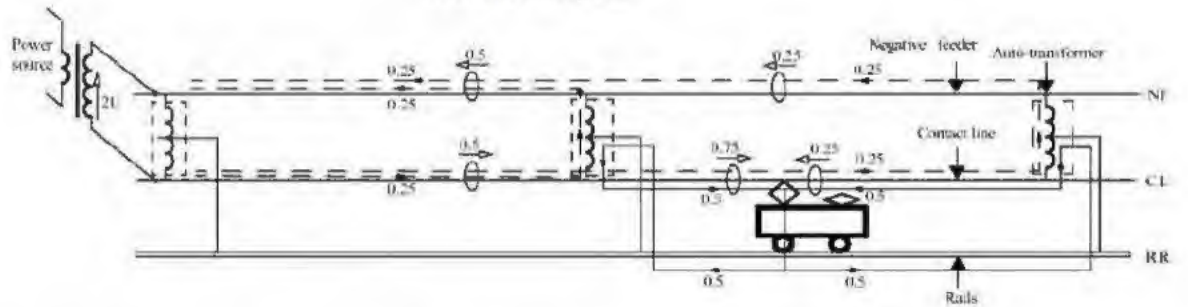
6.2 Schéma soustavy

Napájecí soustavu tvoří:

- napájecí vedení vvn,
- trakční transformovny vvn/2 x 25 kV 50 Hz,
- autotransformátorové stanice (ATS) - slouží k transformaci napětí 50 kV, které je mezi trolejovým vedením a napájecím vodičem, na napětí 25 kV mezi trolejovým vedením a zpětným kolejnicovým vedením určeným pro napájení elektrických trakčních vozidel,
- spínací stanice 2 x 25 kV - pro podélné spínání trolejového a napájecího vedení. Může být součástí ATS,
- trakční vedení 2 x 25 kV - na trakčních podpěrách je společně s trolejovým vedením podél celé tratě instalován napájecí vodič.

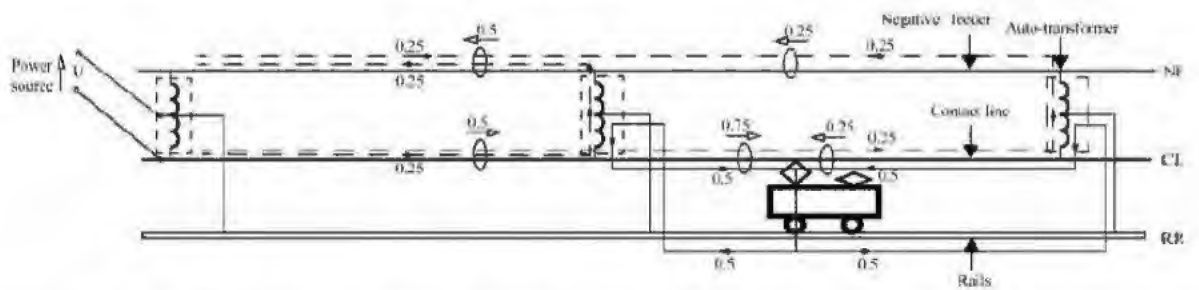


AT-2U soustava



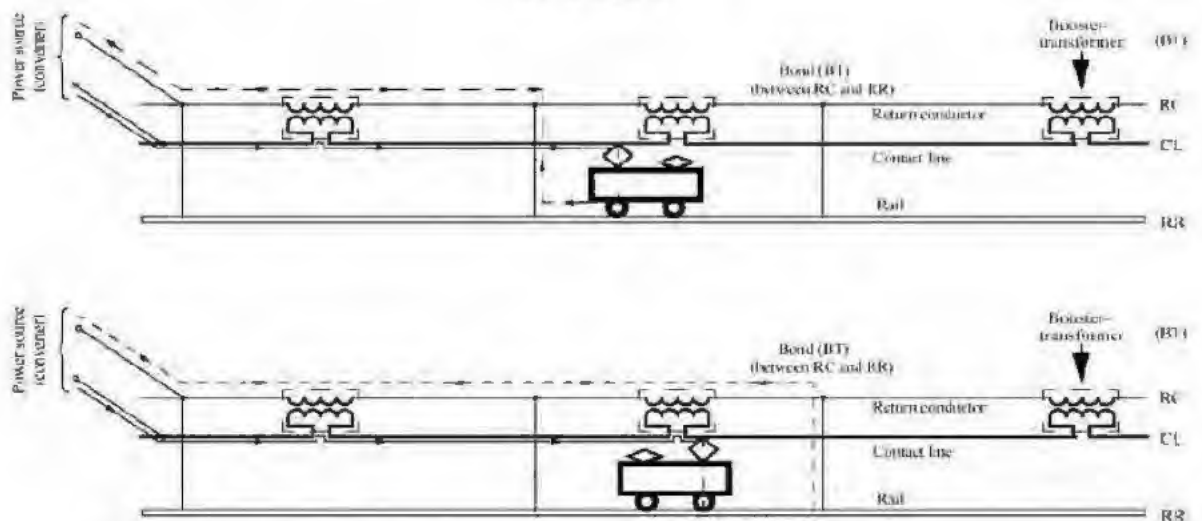
Obr. 63 Schéma AT 2U s plným rozsahem napájecího napětí. Trakční transformátor se dvěma sekundárními vinutím [27]

AT-1U soustava



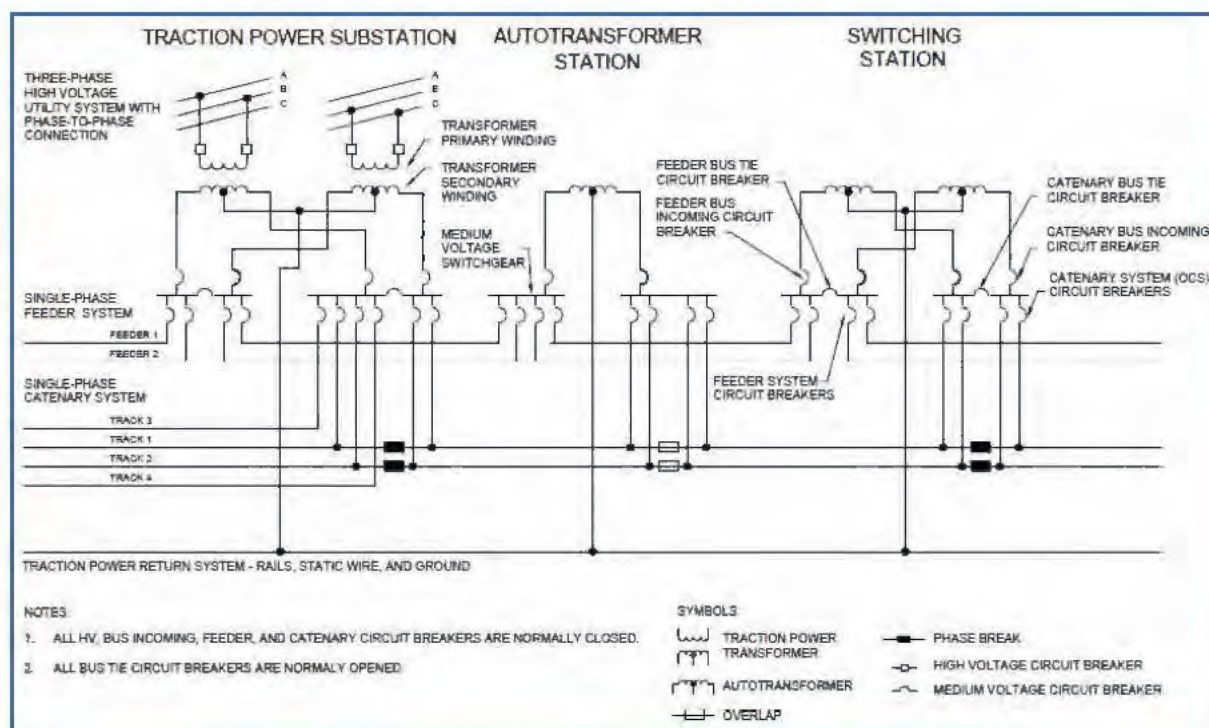
Obr. 64 Schéma AT 1U (zjednodušená AT soustava) s napájením trolejového vodiče. Trakční transformátor s jedním sekundárním vinutím [27]

BT soustava



Obr. 65 Schéma BT se zpětným vodičem soustav [27]

Schéma zapojení trakční napájecí stanice, autotransfórnové a spínací stanice



Obr. 66 Typická konfigurace zapojení napájecí soustavy 2 AC 25 kV [40]

6.3 Trakční transformátory

Trakční transformátor je buď jednofázový, obvykle s vyvedeným středem sekundárního vinutí, který je uzemněn a připojen na kolejnici. Hodnota jmenovitého primárního napětí transformátoru je dána hodnotou napětí provozovaných sítí vvn. Sekundární napětí je $2 \times 27,5$ kV.

Obr. 67 Trakční transformátor pro síť 2×25 kV [25]

6.3.1 Autotransformátory

Autotransformátory jsou nedílnou součástí napájecího soustavy 2 AC 25 kV. Jsou určeny pro transformaci napětí 50 kV na napětí 25 kV potřebné pro EHV. Vinutí autotransformátoru je připojeno mezi přívodní napájecí vedení a trolejové vedení. Střed vinutí je připojen na kolejnici (AT soustava). Jako příklad je zde uveden autotransformátor o výkonu 15 MVA,

$U_n +27,5/0/- 27,5$ kV firmy Alstom, používaný na železnicích SNCF.



Obr. 68 Autotransformátor (železnice SNCF Francie) [17]

6.4 Rozváděče transformoven

Provedení a výzbroj rozváděčů musí být v souladu s platnými předpisy a normami. Principiálně je shodné s jednofázovou napájecí soustavou AC 25 kV 50 Hz.

6.5 Odpojovače, odpínače a výkonové vypínače

Spínací prvky musí být konstruovány na hodnotu jmenovitého napětí 50 kV, obvykle v dvoupólovém provedení.

6.6 Ochrany

Ochrany musí být v souladu s příslušnými státními normami a předpisy. Jednotlivé druhy ochran používaných ve vývodech a pro transformátory jsou uvedeny např. v kapitole 5.6. Seznam použitých ochran se může lišit dle národních zvyklostí.



Kontrolní otázky:

- 6.1 Jaké jsou výhody a nevýhody soustavy 2AC 25 kV 50 Hz ?
- 6.2 Jaké je základní schéma napájení soustavou 2AC 25 kV 50 Hz ?
- 6.3 Jaké jsou základní prvky a jejich funkce u soustavy 2AC 25 kV 50 Hz ?

7 PROBLEMATIKA VEDENÍ ZPĚTNÉHO TRAKČNÍHO PROUDU

Klíčová slova:

Základní pojmy, odlišnosti DC a AC tratí, tratě napájené AC a DC soustavami, aktivní a pasivní zpětný vodič, redukční faktor, řešení s použitím autotransfómátorů.

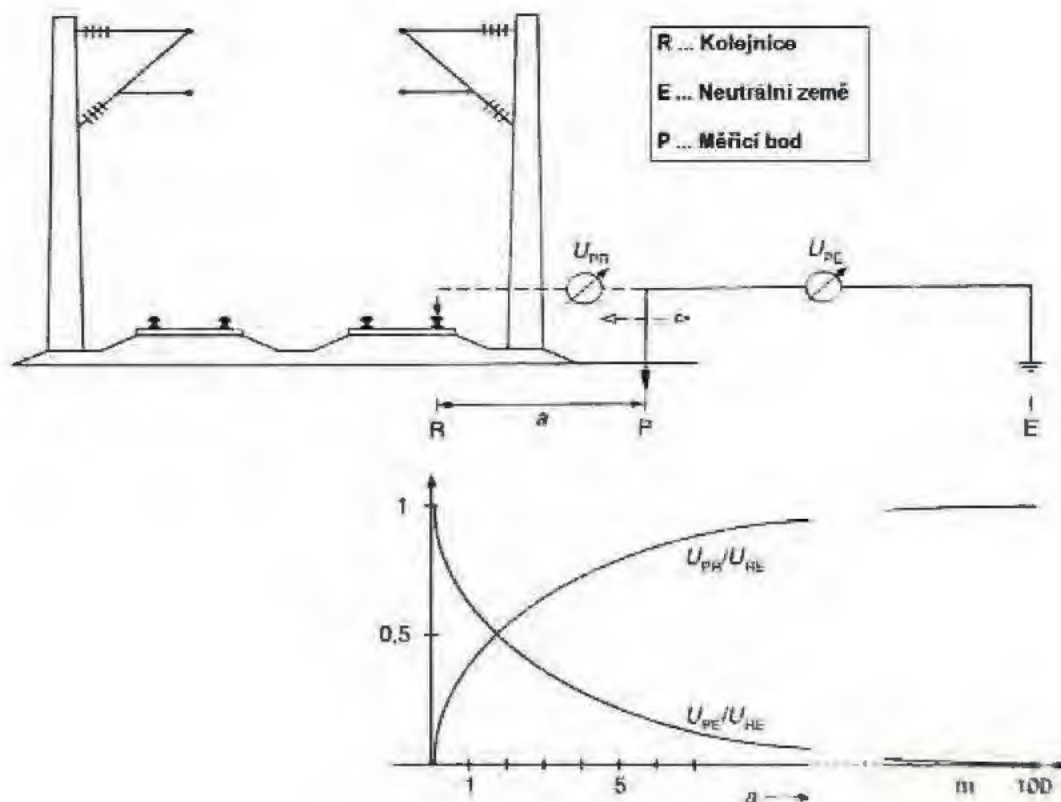
Cíl studia:

Seznámení studenta s problematikou vedení zpětného trakčního proudu u AC a DC soustav.

7.1 Základní pojmy

Nejprve je nutné zaměřit se na definici základních pojmů, které vychází z norem ČSN EN 50122-1 [41] a ČSN EN 50122-2 [42]:

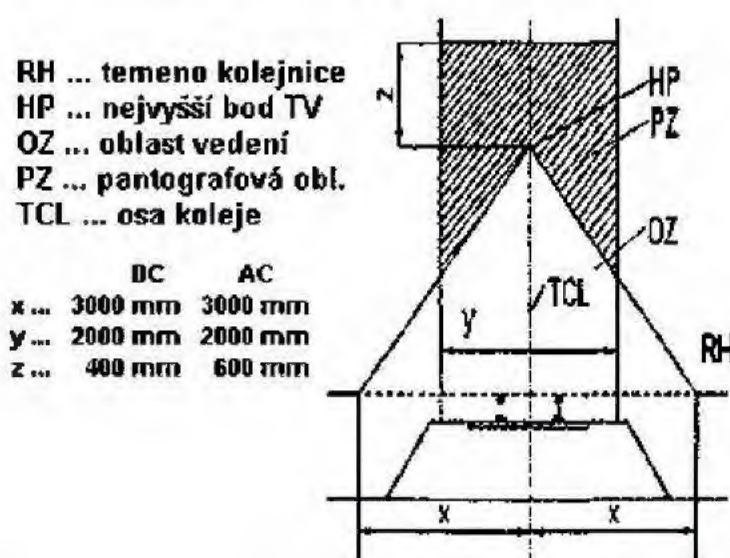
- **Země** – v oboru elektrotechniky je definována jako vodivá zemina, jejíž elektrický potenciál je ve všech bodech roven nule (často se vyskytují také pojmy *vztažná (referenční) země*, *neutrální země* nebo *vzdálená země*). Jedná se o zem, která se nachází mimo prostor vlivu elektrických zařízení, kde mezi různými body země není žádný rozdíl napětí způsobený zemními zpětnými proudy. Vzdálenost této země od zemnicích zařízení energetických vedení může být od 10 m až do 1 km. Závisí na rozloze těchto zařízení, na vlastnostech a kvalitě země a na velikosti zemních proudů.



Obr. 69 Průběh napětí v okolí tratě [43]

- *Zemnič* – vodivé těleso nebo soubor vzájemně spojených vodivých těles ve styku se zemí, zajišťující s ní elektrické spojení. Jako zemniče se mohou používat kovové desky, případně pásy, nebo kov obsahující části (např. základy budov nebo stožárů).
- *Specifický zemní odpor* – elektrická vlastnost uzemnění, závisí zejména na vodivosti země. Jeho číselná hodnota představuje odpor krychle zeminy o hraně 1 m mezi jejími dvěma protilehlými stěnami, obvykle se udává v $\Omega \cdot m$.
- *Přechodový zemní odpor* zemniče udává odpor proti zemi. Většinou je ho možné pro účely projektování určit z geometrických rozměrů zemniče (např. z délky zemnicího pásu) a ze specifického zemního odporu okolní půdy, obvykle se udává v Ω .
- *Země trakční soustavy* – kolejnice, pokud je používána jako zpětné vedení (ZV) a je záměrně připojena k zemi. Země trakční soustavy zahrnuje všechny vodivé části k ní připojené - skládá se z více zemničů, které jsou navzájem vodivě spojeny. Jako *stavební uzemnění* se nazývají vodivě propojené soubory železobetonových částí a kovové stavební části jiných staveb. K těmto částem se počítají např. nástupiště, budovy v prostoru stanic, mezistaničních úseků, mosty, viadukty a tunely. U tunelů se tyto propojené části nazývají také *uzemnění tunelu*. Koleje DC soustav nejsou úmyslně uzemňovány. Pojem *zem trakční soustavy* by u DC soustav vedl k nesprávným závěrům, a proto se zde nepoužívá.
- *Přímé uzemnění trakční soustavy* - přímé spojení neživých vodivých částí trakční soustavy se zemí (obvykle se provádí na AC tratích). Uzemnění přes impedanční propojky, provedené podle uspořádání kolejových obvodů, je považováno za přímé uzemnění.
- *Nepřímé uzemnění trakční soustavy* - spojení neživých vodivých částí s uzemněním trakční soustavy pomocí přístrojů nebo vypínacích obvodů omezujících napětí, které zajišťují vzájemné vodivé spojení po dobu, kdy je překročena přípustná hodnota napětí (v některých případech může dojít i k trvalému spojení). Na DC tratích se provádí spojení na zpětné kolejové vedení výhradně přes průrazku tj. omezovač napětí.
- *Napětí na uzemnění* – vzniká mezi zemničem a zemí. Stanoví se z přechodového odporu zemniče a z procházejícího proudu.
- *Potenciál kolejnice (proti zemi)* - vzniká působením zpětného trakčního proudu účinkem jak provozních tak poruchových proudů na zpětném kolejnicovém vedení a na připojených vodivých částech.
- *Dotyková napětí* – dělí se na *přímá dotyková napětí* a *nepřímá dotyková napětí*.
 - *Přímá dotyková napětí* – vznikají při dotyku živých vodivých částí pod napětím. Jako ochranná opatření slouží například izolační kryty nebo zábrany na zamezení neúmyslného dotyku a stanovení ochranných vzdáleností v okolí vodivých částí.
 - *Nepřímá dotyková napětí* – vznikají při poruchových stavech a při některých provozních stavech na neživých vodivých částech. Tyto stavy jsou obvykle rychle odstraněny, takže dotyková napětí působí na člověka jen krátkou dobu. Pro DC nepřímá dotyková napětí jsou pro dobu trvání delší než 0,2 s přípustné hodnoty vyšší než pro AC napětí průmyslové frekvence, protože lidský organismus je na účinky DC napětí méně citlivý.

- *Přístupná napětí* – napětí mezi kolejnicí a zemí nebo mezi dvěma kolejnicemi, které by mohly být vodivě přemostěny osobou průchodem proudem tělem zpravidla z ruky do obou nohou, nebo z ruky do ruky (vodorovná vzdálenost 1 m k místu dotyku).
 - *Dotyková napětí (skutečná)* – napětí při poruše mezi částmi, které jsou přemostěny dotykem. Hodnota dotykového napětí může být znatelně ovlivněna impedancí těla, které se dotýká těchto částí. Pro tato měření se odpor lidského těla nahrazuje odporem 1000 Ω , na kterém se měří úbytek napětí.
- *Oblast trakčního vedení a pantografová oblast* - oblast, jejíž hranice jsou vymezeny dosahem přerušovaného trakčního vedení nebo pantografem pod napětím, případně vychýlením pantografu nebo poškozením jeho částí. V takto vymezených oblastech jsou nutná opatření proti nepřípustným dotykovým napětím, obr. 70.



Obr. 70 Prostor sběrače a prostor trakčního vedení podle ČSN EN 50121 1 [44]

Pro zpětná kolejnicová vedení není definována žádná ochranná oblast.

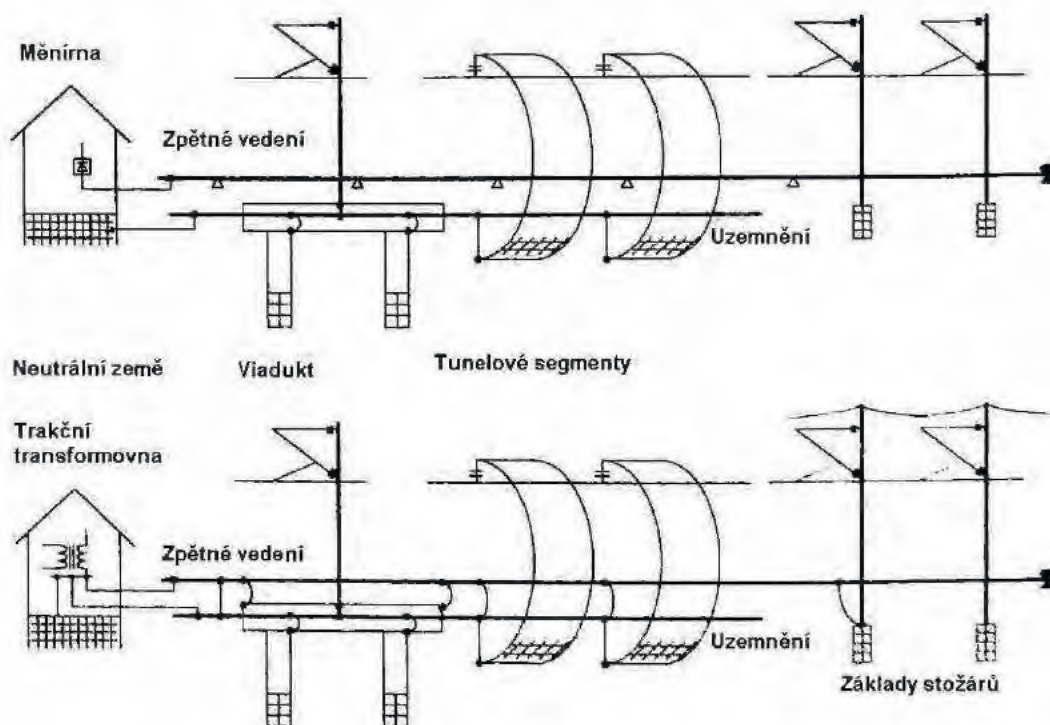
- *Zpětná vodivá cesta* – zpětný trakční proud teče zpětnou vodivou cestou z EHV do TNS. Do této kategorie patří:
 - *Zpětné kolejnicové vedení* – vedení tvořené elektricky propojenými kolejnicemi
 - *Zesilovací vedení zpětné vodivé cesty* – paralelně s kolejemi provedená vedení v pravidelných vzdálenostech připojovaná ke zpětnému kolejnicovému vedení (na většině tratích v ČR se vzhledem k použitému typu zabezpečovacího zařízení nemohou používat). Na DC tratích se k tomuto účelu používá izolovaných kabelů, aby se nezvýšil únik bludných proudů do země. Na AC tratích je možno použít klasické zemnicí pásy položené podle kolejí, nebo lana zavěšená na trakčních stožárech. Všechny kolejnice použité k vedení zpětného proudu je nutno opatřit elektrovednými propojkami. Ke zvýšení vodivosti stávajících zařízení zpětné cesty je vhodné použít ke kolejnicím paralelně připojené vodiče.

- Zvláštní formou vedení zpětné vodivé cesty na AC soustavách jsou systémy s booster transformátory a s autotransformátory.



7.2 Odlišnosti DC a AC tratí

Zpětná vedení musí být řešena tak, aby spolehlivě, bez negativních vlivů na bezpečnost a spolehlivost provozu převáděla trakční, případně rekuperační zpětné proudy, případně zkratové a jiné poruchové proudy do TNS. Odpor ZV musí být co nejnižší, aby negativní vlivy zpětných proudů, tj. zejména potenciál kolejí proti zemi a dotyková napětí zůstala v povolených mezích. Jednotlivé kolejnice musí být proto vybaveny podélnými i příčnými propojkami.



Obr. 71 Schéma uzemnění na elektrických tratích: DC soustava (nahore), AC soustava (dole) [43]

7.2.1 DC tratě

Na tratích napájených DC soustavami je prioritní požadavek na dodržení co nejvyššího odporu kolejnicového vedení proti zemi a proti uzemněným zařízením v blízkosti. Důležité je rovněž dlouhodobé udržení tohoto odporu. Cílem opatření je zamezení úniku bludných proudů a tím zamezení škod působených DC bludnými proudy. Na podélném odporu kolejnicového vedení vzniká úbytek napětí, který je při větších provozních proudech nebo při zkratech příčinou zvyšování potenciálu kolejí. Při větších délkách trati a vyšších proudech se tak zvyšuje nebezpečí vzniku nebezpečných dotykových napětí kolejí proti uzemněným částem.

7.2.2 AC tratě

Na AC zpětných kolejových vedeních vznikají indukční napěťové úbytky, které jsou při frekvenci 16,7 Hz přibližně stejné a při frekvenci 50 Hz zhruba dvojnásobné než na DC. Při větší délce napájených AC úseků (oproti DC) to vede i při úměrně nižších trakčních proudech k vyšším potenciálům kolejí vůči zemi. Snížení těchto potenciálů pod dovolené

hodnoty se dosáhne uzemněním zpětného vedení, tj. kolejnic a přidáním paralelních lan, případně použitím paralelních zemních pásků podél trati.

Při použití booster transformátorů nebo autotransformátorů se postupuje podobně.

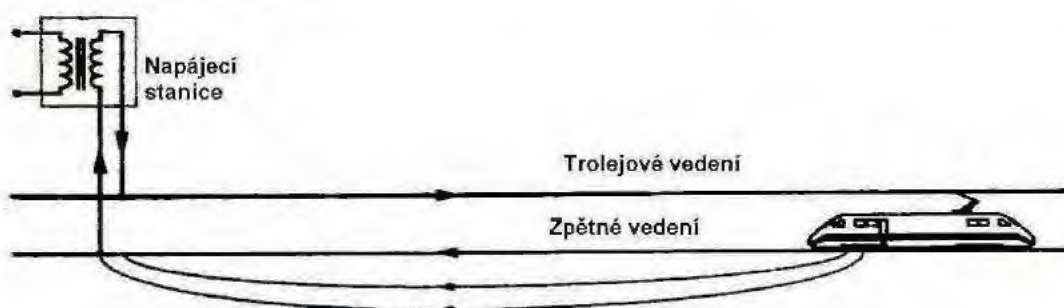
V důsledku uzemnění zpětných vedení teče část trakčního zpětného proudu zemí a uzemněnými částmi (základy staveb, trakčních stožárů apod., což se nepříznivě projevuje například rušením elektronických systémů.

7.2.3 Mimodrážní elektrická zařízení

Uzemnění mimodrážních elektrických zařízení v blízkosti elektrických trakčních zařízení se nesmí spojit s částmi zpětných trakčních vedení. Totéž platí pro nn přípojky z veřejné energetické sítě.

7.3 Tratě napájené AC soustavami

Zvyšující se trakční výkony a s nimi spojený růst trakčních proudů a v neposlední řadě i tlak na snižování investičních a provozních nákladů si postupně vyžadoval změnu konceptů řešení zpětné vodivé cesty AC tratí.



Obr. 72 Cesta zpětného proudu na AC soustavě kolejemi bez dalších zpětných vodičů [43]

Zvýšila se bezpečnost osob a elektrických zařízení. Byla snížena intenzita magnetického pole. Zpětná vodivá cesta zaznamenala nová technická řešení.

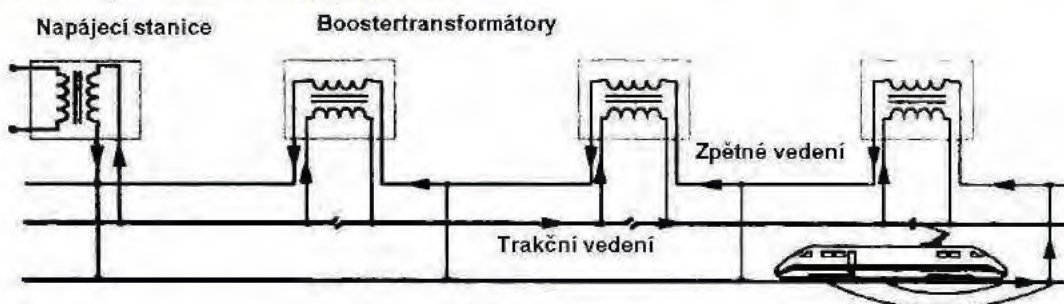
Při původním systému zpětného, výhradně kolejnicového vedení (dosud prováděno v ČR) uniká při normálních půdních poměrech do země více než polovina trakčních zpětných proudů. Vznikla nová řešení zpětné cesty pomocí autotransformátorů (AT) a booster transformátorů (BT) [45].



Obr. 73 Cesta zpětného proudu na AC soustavě s AT [43]

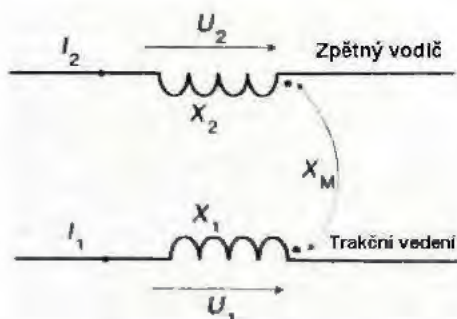
Při AT systému napájí TNS traťový úsek dvoufázově (úhel posunu fází je 180°). Střed vinutí trakčního transformátoru i AT je připojen ke zpětnému kolejnicovému vedení. Jedna fáze je

připojena na trolejové vedení, druhá na tzv. negativní napáječ. AT jsou připojeny stejným způsobem ve vzájemné vzdálenosti 10 až 20 km na soustavách s kmitočtem 50 Hz, nebo 20 až 40 km na soustavách s kmitočtem 16,7 Hz. Dva sousední AT pracují v podstatě jako dvě klasické TNS a napájejí dvoustranně jednotlivé úseky. V tomto zapojení dochází ke snížení úbytků napětí a ke snížení úniku zpětných proudů z kolejnicového vedení, čímž se dá značně prodloužit délka napájeného úseku. Toto řešení bylo přednostně využito v Japonsku a ve Francii pro napájení vysokorychlostních tratí, kde přineslo značné investiční úspory. Použitím AT se dosáhne největších délek napájených úseků.



Obr. 74 Cesta zpětného proudu na AC soustavě s BT [43]

Booster transformátory (BT), někdy též nazývané jako „sací transformátory“, obr. 75 jsou dvouvinut'ové proudové transformátory o převodu 1:1, které jsou vřazeny do trolejového vedení ve vzdálenostech 3 až 5 km.



Obr. 75 Schéma BT [43]

Primární vinutí překlenuje elektrické dělení v trakčním vedení (prochází jím trakční proud trolejového vedení), sekundární vinutí je připojeno ke kolejím zhruba uprostřed mezi dvěma sousedními BT a prochází jím proud stejné velikosti ale opačného směru, který „odsává“ zpětný proud z kolejí a ze země do zpětného vodiče zavěšeného izolovaně na stožárech, kterým teče až do TNS. Následující vzorce pro výpočet BT vycházejí stejně jako při výpočtu poměrů na běžných transformátorech ze zjednodušujících předpokladů, tj. zejména zanedbání ztrát v železe [46].

$$U_1 = I_1 \cdot R_1 + I_1 \cdot jX_{\sigma 1} + I_1 \cdot jX_1 + I_2 \cdot jX_M \quad (1)$$

$$U_2 = I_2 \cdot R_2 + I_2 \cdot jX_{\sigma 2} + I_2 \cdot jX_2 + I_1 \cdot jX_M \quad (2)$$

kde U_1, U_2 je napětí na vinutí [V]

I_1, I_2 proud vinutím [A]

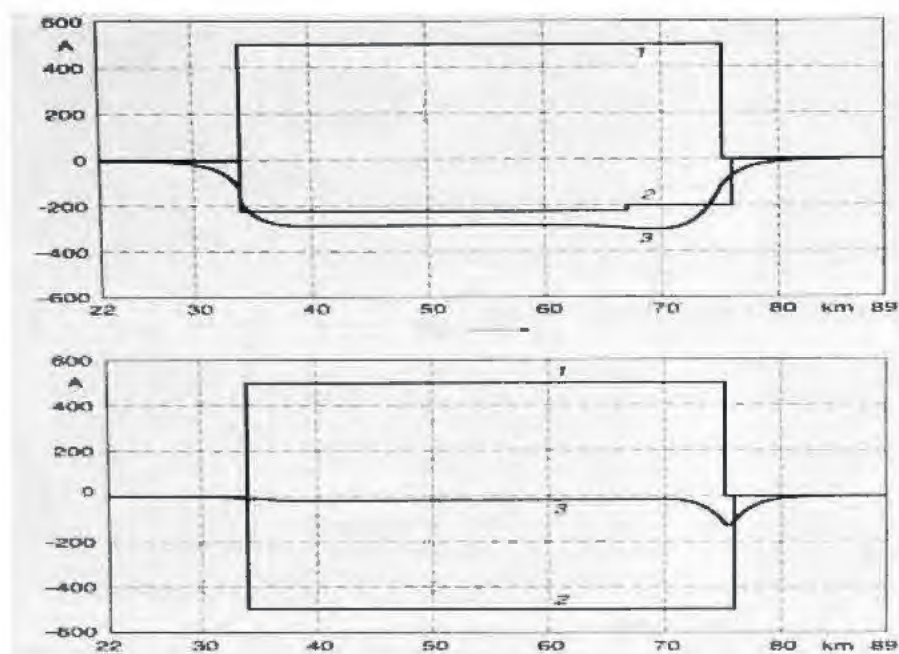
R_1, R_2 ohmický odpor vinutí [Ω]

$X_{\sigma 1}, X_{\sigma 2}$ rozptylová indukčnost [Ω]

X_1, X_2 indukčnost vinutí [Ω]

X_M vzájemná indukčnost [Ω]

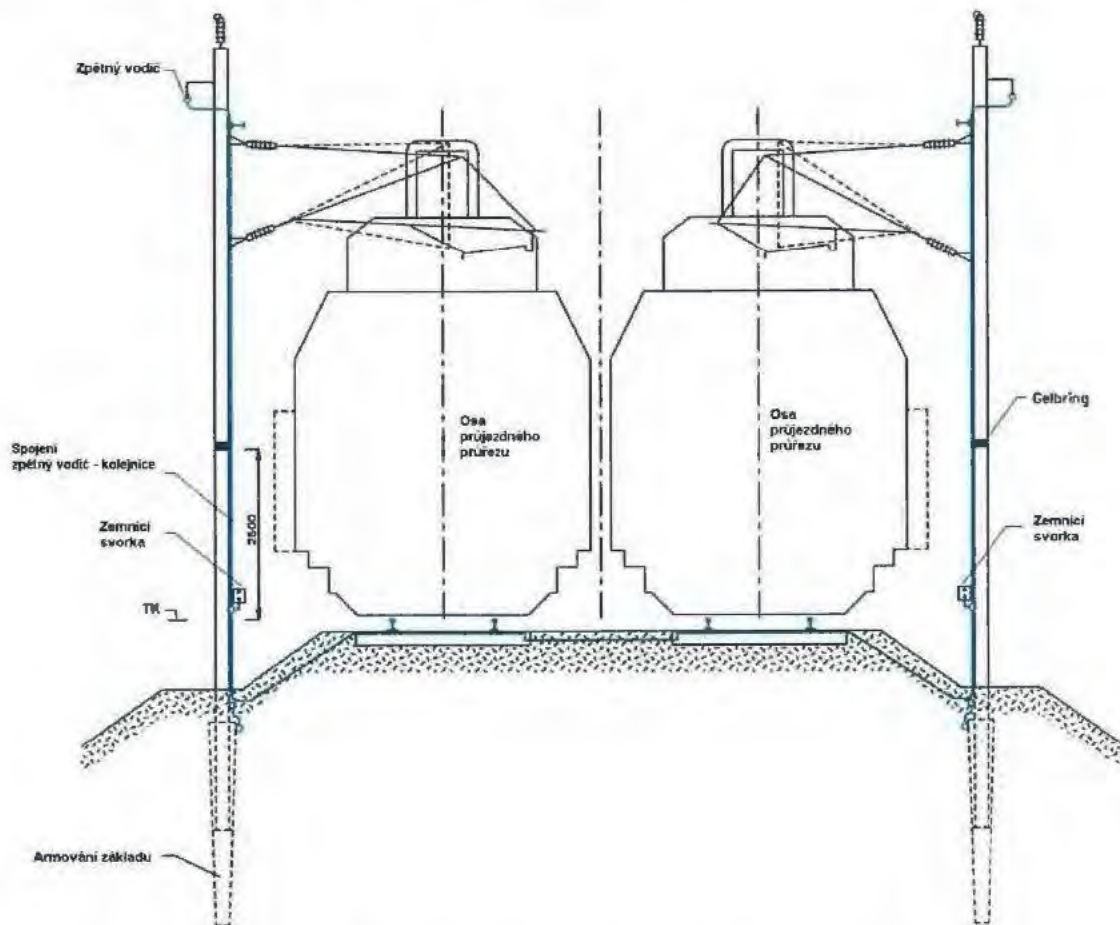
Rozdělení proudů podél trati ukazuje obr. 76. Použitím BT se efektivně potlačují negativní vlivy na ostatní elektrická zařízení v blízkosti tratě. Jedná se však o řešení nákladnější, provozně méně výhodná a komplikovanější.



Obr. 76 Rozdělení proudů podél trati. Nahoře zpětný vodič bez BT, dole zpětný vodič s BT (1 trakční vedení, 2 zpětný vodič, 3 proud zemi) [43]

Nový, levnější systém výstavby ZV spojený s příznivými účinky na vedení zpětného proudu byl poprvé použit při výstavbě vysokorychlostní tratě Madrid – Sevilla a později na nových i rekonstruovaných tratích DB. Vyznačuje se tím, že na zpětné kolejnicové vedení jsou v pravidelných vzdálenostech několika set metrů připojeny podél trati vedené paralelní vodiče, na které jsou dále připojeny všechny uzemňovací soustavy, jako jsou trakční stožáry se svými armovanými betonovými základy, armování základů budov, mostů, částí viaduktů, armování tunelů, ochranná uzemnění nn zařízení, svodiče přepětí, apod.

Takto pospojované součásti zpětné vodivé cesty vytvářejí univerzální zemnicí ochrannou soustavu, která se využívá pro elektrická zařízení nn i vn, pro elektrická zabezpečovací a sdělovací zařízení a pro ochranu proti přepětí. Německý název „Bahnerde“ se v EN do češtiny překládá jako „země trakční soustavy“.



Obr. 77 Zpětné vodiče a jejich příčná propojení v mezistaničních úsecích [43]

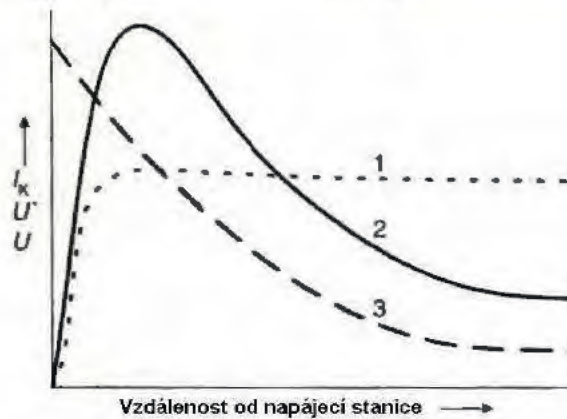
V hořejší části stožárů jsou vedena lanová zpětná vedení, rovněž pravidelně (po 200 m až 600 m) pospojovaná s kolejnicovým vedením. Na dvoukolejných tratích jsou ZV obou kolejí propojována nejen s kolejemi, ale i navzájem. Vlivem tohoto uspořádání, zejména působením zpětných lanových vodičů v blízkosti trolejového vedení se dosáhne výborná induktivní vazba, redukce magnetických polí, snížení napětí kolejí proti zemi a současně se tak dosáhne podstatně lepšího rozdělení zpětných proudů.

7.3.1 Ochrana osob

Zpětné kolejové vedení musí být na AC tratích provedeno tak, aby zamezilo nebezpečí úrazu elektrickým proudem a byla tak zajištěna ochrana osob. Jako hlavní opatření se používá spojení neživých vodivých částí v blízkosti trakčních vedení, které mohou být v případě poruchy pod napětím s trakčními kolejnicemi. Totéž platí pro části, které mohou být pod napětím v případě přetržení trakčních vodičů nebo při vykolejení vozidel. Ukolejnění těchto částí vede ke spolehlivému vypnutí následného zkratového proudu a zaručuje tak bezpečnost osob.

Pokud není možno provést přímé ukolejnění na ZV AC soustavou napájené trati, např. při souběhu s tratí elektrizovanou DC proudem, je nutno použít omezovače napětí připojené na zpětné vedení tratě elektrizované AC soustavou. V tomto případě mluvíme o otevřeném ukolejnění. Takto se ukolejnňují zejména neživé části menších rozměrů, kde jejich délka v podélném směru nepřesahuje 2 m a které nenesou žádná elektrická zařízení.

Potenciál kolejí proti zemi musí odpovídat požadavkům na dotyková a přístupná napětí. Tento potenciál vzniká účinky proudu ve ZV, závisí na provozních nebo zkratových proudech, na odporu kolejí proti zemi a na vzdálenosti hnacího vozidla, případně místa zkratu od TNS. Jeho velikost se obvykle vyjadřuje v závislosti na 100 A proudu v trakčním vedení.



Obr. 78 Průběh napětí na kolejnicích v závislosti na vzdálenosti od TNS: 1 ... $[U]$ při konstantním trakčním odběru; 2 ... $[U]$ při zkratu; 3 ... $[I_k]$ průběh zkratového proudu [43]

Zkratový proud je největší při zkratu na TNS. Potenciál kolejí proti zemi je v tom případě nulový. Nejvyšší hodnotu dosahuje potenciál kolejí po několika kilometrech od TNS. Pro určení ohrožení nebezpečným potenciálem kolejí slouží graf průběhu růstu potenciálu kolejí proti zemi v závislosti na délce napájeného úseku. Teoretický průběh potenciálu U_{PE} na povrchu země proti neutrální zemi a průběh potenciálu U_{PR} , tj. dotykové napětí proti kolejnicím vedoucím zpětný proud (proti vozovým skříním), vztažený na napětí U_{RE} (kolejnice – neutrální země) ukazují obr. 69 a obr. 78. Jako dotykové napětí se považuje napětí ve vzdálenosti 1 m od vnější kolejnice, případně od vodivých neživých částí spojených s kolejnici. Podle [47] dosahuje dotykové napětí v průměru 20 % napětí U_{RE} . Jiné prameny [45, 48] uvádějí pro elektrická zařízení vn hodnotu až 50 % U_{RE} , Tab. 6.

Tab. 6 Dovolena přístupná a dotyková napětí

Dovolena přístupná a dotyková napětí		U_r [V]	$U_{RE} = 2 U_r$ [V]
Provozní dotyková napětí	$t > 300$ s	60	120
Provozní dotyková napětí	$t = 300$ s	65	130
Poruchová dotyková napětí	$t = 100$ ms	842	1 684

Časy vypnutí poruchových proudů mohou u některých nových zařízení klesnout pod 100 ms. I v těchto případech se ale uvažují hodnoty podle Tab. 6. Vlivem vodivých propojení se mohou nebezpečné potenciály z cizích soustav zavlékat do drážních systémů. Aby se zabránilo vzniku nebezpečných dotykových napětí, je nutno v těchto případech použít dodatečná opatření známá i z našich dřívějších předpisů, jakou jsou dodatečná izolace zařízení nebo ochranný izolační povrch (např. šterk, asfalt).

7.3.2 Ovlivňování ostatních zařízení

Zpětná trakční vedení mohou ovlivňovat činnost ostatních železničních zařízení působením:

- ohmických vlivů,
- kapacitních vlivů,

- induktivních vlivů,
- vlivů elektrických a magnetických polí.

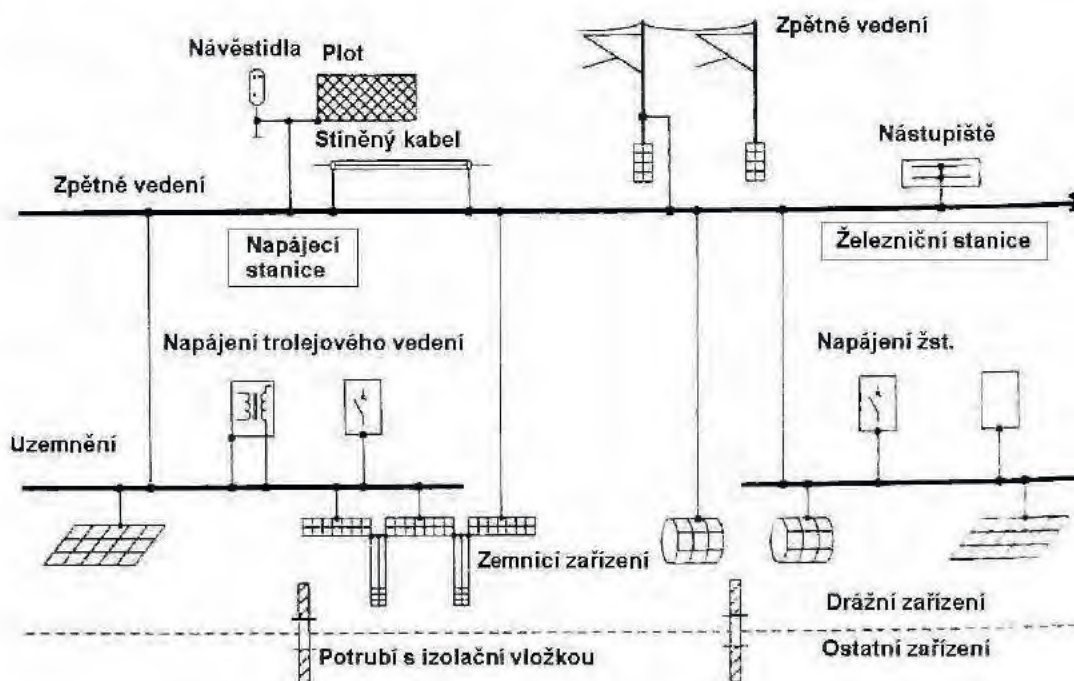
Ohmické vlivy vznikají vodivými propojeními se systémem ZV a většinou nejsou nebezpečné.

Kapacitní vlivy jsou z hlediska praktického významu nepodstatné.

Na tratích napájených AC soustavami jsou důležité zejména vliv indukční a vliv magnetického pole. Tyto veličiny závisí, tak jako rozdělení zpětných proudů, od vlastní a vzájemné impedance a od konfigurace trakčního vedení. Zpětný proud tekoucí zemí představuje měřítko negativního ovlivňování. Zpětné vodiče redukuje zpětný proud tekoucí zemí a tím omezují ovlivňování ostatních zařízení v okolí. Toto ovlivňování se týká jak drážních, tak ostatních elektrických zařízení v bezprostřední blízkosti tratí. Podle citlivosti těchto zařízení může potom docházet k jejich ovlivnění nebo i k poškození.

7.3.3 Konstrukce zařízení

K zamezení nebezpečných dotykových napětí za provozního stavu a při poruchových stavech (při zkratech, případně při spínacích pochodech) je nutno neživé vodivé části elektrických provozních zařízení, části zpětných vedení a ostatní neživé vodivé části v prostoru trakčního vedení a v prostoru sběrače spojit s uzemněnou kolejnicí. Principiální schéma pro realizaci ochranných opatření je na obr. 79. Jednotlivé uzemněné části mostů, tunelové segmenty a základy stožárů jsou opět navzájem spojeny a navíc propojeny se zpětnou vodivou cestou. Vytvářejí tak ucelenou zemnicí soustavu AC tratí. Současně se tímto způsobem zajišťují požadované parametry uzemnění a zpětné vodivé cesty.



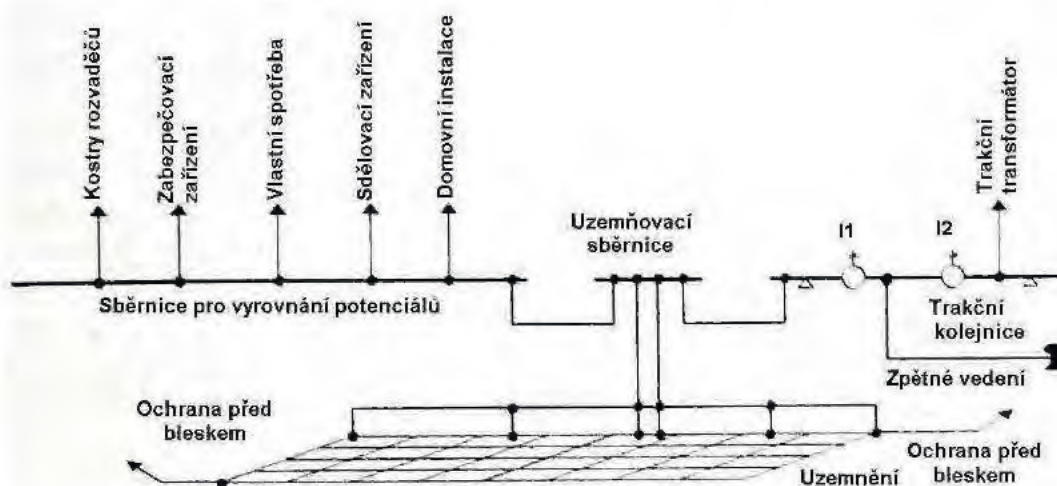
Obr. 79 Schéma vedení zpětného proudu a uzemnění [43]

7.3.4 Zpětné vedení

Pojem ZV zahrnuje jízdní kolejnice, zpětná lanová vedení a propojovací vedení s TNS. Aby se dosáhlo co nejmenších úbytků napětí, propojují se kolejové styky svařovanými propojkami.

Výhybky se doplňují podélným nízkoohmovým propojením. Aby se zpětný proud rovnoměrně rozdělil do všech paralelních kolejí a zpětných lan, musí být tato paralelní vedení navzájem v pravidelných vzdálenostech propojována. Vzájemná vzdálenost těchto propojení je závislá na vlnové impedanci ZV a na přípustných dotykových napětích. Pohybuje se mezi 200 až 600 m. U úseků napájených z rotačních nebo statických měničů se používají vzdálenosti až 1200 m, protože měniče mohou účinně omezovat zkratový proud.

Do TNS tečou zpětné proudy podle obr. 80 zpětným vodičem a zemními propojkami, na izolované sběrnici zpětného proudu. Zpětný vodič musí být proveden jako zdvojený a dimenzován tak, aby každý z obou zpětných vodičů přenesl plné teoreticky možné zatížení TNS. Stav zpětného vedení se trvale kontroluje proudovým transformátorem I1 (celkový trakční proud) a proudovým transformátorem I2 (část zpětného proudu tekoucí zemí).



Obr. 80 Schéma vedení zpětného proudu a uzemnění v trakční transformovně [43]

7.3.5 Zařízení tunelů

Železobetonové vzájemně vodivě propojené konstrukční části staveb představují zemnicí rozložení podél trati. Pro redukci potenciálu kolejí, z důvodů ochrany před dotykovým napětím a vyrovnání potenciálu, jsou všechny díly s výztuží navzájem propojeny a spojeny s trakční kolejnici. K tomu se využívají především lana ZV. K zemnění stavebních částí trakčních vedení (stožary, základy) se využívá rovněž především zpětných vodičů. Obecně platí: jsou-li proudová propojení kolejí se zpětnými vodiči dobře provedena, není nutno provádět dodatečná propojení pro uzemnění stavebních částí.

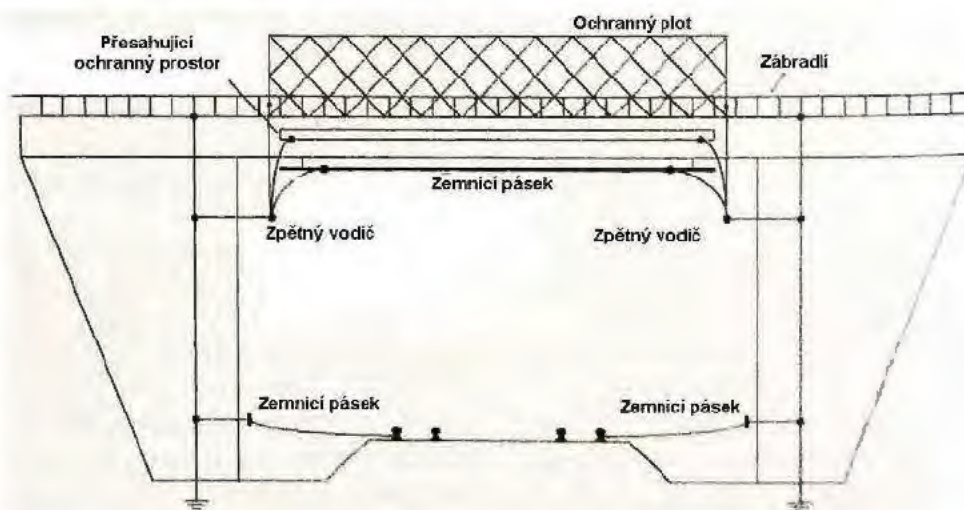
Měření odolnosti připevňovacích nerezových šroubů a kolejí proti zkratovým proudům ukázala, že termickými účinky zkratového proudu 33 kA o trvání 350 ms nevzniklo na spojích nebezpečné oteplení.

U tunelů, kde z důvodu spodních vod se použije utěsnění stavby izolační folií, mohou vznikat až dvojnásobná dotyková napětí. U takových tunelů je potom nutno provádět dodatečná opatření pro uzemnění všech konstrukčních částí.

7.3.6 Viadukty

Základy podpěr a viaduktů představují dodatečné uzemnění rozložené podle trati. Aby bylo možno kladné účinky těchto uzemnění využívat, je nutno dodržet podmínku elektrického propojení jednotlivých segmentů viaduktů přes podpěry s podzemní částí základů. Trakční

stožáry na viaduktech a jejich výstroj je možno také vodivě propojit se zemí viaduktu a tak využít pro tyto účely. Pokud se tyto propoje provedou co nejkratším směrem a bez zbytečných ohybů, mohou výhodně sloužit jako svodiče přepětí viaduktu, obr. 81.



Obr. 81 Ochrana silničních mostů křižujících železniční trať [43]

7.3.7 Cizí zařízení

Cizí, tj. mimodrážní, se zemí spojená zařízení v blízkosti trati nesmějí být z hlediska nebezpečí šíření bludných proudů spojena s drážní zemí tj. ukolejněna. Z toho důvodu musí být odbočující potrubí provedena z izolačních materiálů, případně je nutno na hranici drážních pozemků vložit do potrubí elektrickou izolaci. Pokud není oddělení drážního uzemnění a uzemnění veřejné sítě z prostorových důvodů možné, je nutno ZV spojit se sousedním uzemněním veřejné sítě tak, aby napětí vyšší než 50 V nemohla vzniknout. K tomu je nutno použít vodič dostatečně dimenzovaný pro vedení zemních proudů.

Pro neživé vodivé části silničních mostů křižujících prostor trakčního vedení nebo prostor sběrače jsou nutná opatření zajišťující bezpečnost osob, které lze shrnout do následujících bodů:

- pokud jsou stěny mostu v prostoru trakčního vedení nebo sběrače, je nutno propojit armování obou stěn zinkovaným zemnicím páskem,
- pokud se mostní deska nachází v prostoru trakčního vedení nebo sběrače, připojit zinkovaný zemnicí pásek nebo L profil oboustranně na mostní desku,
- vybudovat ochranné oplocení nebo jiné opatření v okrajových částech mostovky.

Přístupné vodivé části musí být dvakrát ukolejněny. U mostů se z důvodu ochrany před atmosférickou elektrinou doporučuje propojit všechny části armování navzájem a současně ukolejnit. Jako náhodné zemniče je i zde možno použít základy mostu.

7.3.8 Ochrana před atmosférickým přepětím

Zařízení elektrizovaných tratí je nutno chránit také před účinky atmosférických přepětí. Na otevřených tratích plní tuto úlohu vodiče zpětných vedení společně s trakčními stožáry a s jejich základy. Propoje se zemněním musí být co nejkratší a bez ohybů, aby se jejich indukčnost a odpor udržely na co nejnižších hodnotách. V místech instalace na přepětí citlivějších zařízení je nutno instalovat vhodné přepětíové ochrany.

Podle statistických zjištění lze ve střední Evropě v těchto případech očekávat, že 95 % proudových impulsů způsobených atmosférickými účinky nepřesáhne hodnotu 40 kA a 99 % nepřesáhne hodnotu 60 kA. Zpětné výboje nelze očekávat, protože rázový zemní odpor R_{St} odpovídá vztahu (3), [49].

$$R_{St} \leq \frac{U_{St}}{I_{St}} \quad (3)$$

kde U_{St} je výdržné rázové napětí [V]

I_{St} vrcholová hodnota bleskového proudu v trakčním stožáru, případně v konstrukční části [kA]

Při uzemňování zařízení malých rozměrů, např. základů stožárů odpovídá rázový zemní odpor přibližně odporu šíření rázové vlny.

Opatření pro vedení zpětného proudu a pro uzemňování se dotýkají zejména železobetonových konstrukcí a musí být pro jednotlivé stavby určena včas. Již v prvním stadiu stavby je nutno instalovat dostatečně proudově dimenzované propojky s armováním. Veškerá proudová propojení armatur betonových částí musí být provedena svářeními, protože šroubové spoje nejsou v korozivním prostředí spolehlivé. Před uvedením do provozu je nutno prokázat celistvost a dostatečné dimenzování zpětné vodivé cesty a bezpečnost osob. K tomu slouží již během projekční fáze výpočet a v rámci předávání i měření na předávaných zařízeních. V rámci uvedení zařízení do provozu je účelné provést měření odporu, potenciálu kolejí a indukovaných napětí. Tato měření mohou později sloužit jako referenční k měřením za provozu. Odpor zemnicích zařízení určuje provozní i poruchová dotyková napětí a potenciál kolejnic. K měření potenciálu kolejnic je nutno zajistit konstantní proud v trakčních kolejnicích mezi dvěma proudovými propojeními. Vlastní potenciál kolejnic se měří proti vzdálené (neutrální) zemi. Vzdálenost místa měření od příčného rozvětvení zpětného vedení by měla být co největší. Napájení do jedné koleje představuje provozní stav, napájení do jedné kolejnice představuje nejnejpříznivější zkratový proud. Naměřené potenciály kolejnic je možno přepočítat na provozní nebo na poruchové proudy.

Provedení paralelních zpětných vedení pomocí lan splňuje požadavky na bezpečnost osob i při vysokých výkonech a proudech. Dodatečné zpětné vodiče (zpětná lana) redukuje ovlivňování, omezují nutná opatření pro uzemňování a umožňují jednoduchou údržbu svršku i pevných trakčních zařízení. Tato koncepce vedení zpětného proudu byla uplatněna například na následujících elektrizovaných úsecích:

- vysokorychlostní trať Madrid – Sevilla,
- elektrizace Magdeburg – Marienborn,
- zkušební okruh Wegberg – Wildenrath,
- vysokorychlostní trať Köln – Rhein/Main,
- BERTS (Bangkok Elevated Road and Train System),
- ERL (Express Rail Link) Kuala Lumpur,
- vysokorychlostní trať Nürnberg – Ingolstadt.

7.4 Tratě napájené DC soustavami

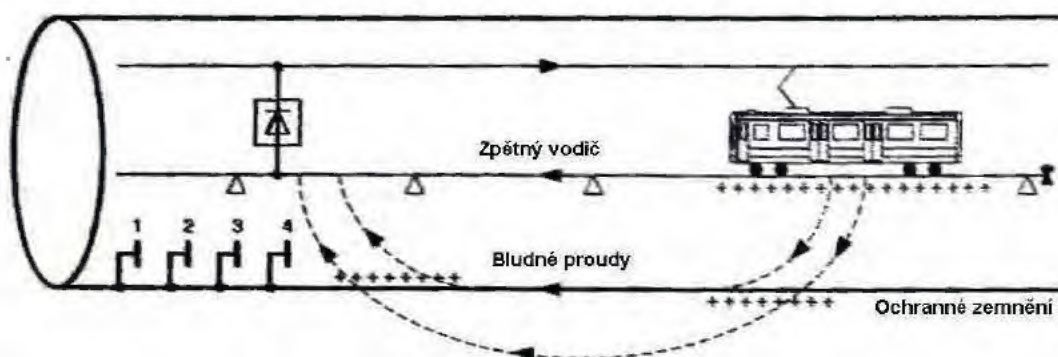
Napájení DC tratí zahrnuje přírodní vysokonapěťové linky s kmitočtem průmyslové frekvence, trakční rozvody DC proudem a napájení zařízení nízkým napětím (včetně budov).



Existují zde různé koncepce vedení zpětného proudu a uzemňování, které musí vyhovovat podmínkám ochrany osob a ochraně před účinky bludných proudů. V neposlední řadě musí také zabezpečovat ochranu provozních prostředků a ochranu před přepětími. Pro provedení ochrany se z dostupných řešení vybírají pokud možno jednoduchá a cenově příznivá řešení, která jako celek zabezpečují celkový koncept řešení [50].

7.5 Výstavba vedení zpětného proudu a uzemnění

Základní elementy pro vedení zpětného proudu a pro zemnění tratě napájené stejnosměrným proudem ukazuje obr. 82. Zpětné proudy tečou jízdnicemi kolejnicemi a izolovanými zpětnými kabely k trakčnímu usměrňovači. Vzhledem k nedokonalé izolaci jízdnic kolejnic proti zemi unikají z kolejnic do země bludné proudy. V zemi pak probíhají elektrolytické děje působící korozi úložných zařízení. Na obr. 82 jsou vyznačeny korozivní oblasti pro případ jednostranného napájení. Řešení ochrany závisí od velikosti proudu, druhu kovu a doby trvání. Dále je znázorněna ochrana pomocí navzájem propojených strojených i stavebních zemničů (Ochranné uzemnění – Bauwerkserde) izolovaných od kolejnic, která slouží k ochrannému uzemnění všech zařízení, (přívodních linek průmyslové frekvence, napájení trakčních rozvodů DC proudem i napájení zařízení nn.



Obr. 82 Ochrana silničních mostů křížujících železniční trať [43]

7.5.1 Bezpečnost osob

Bezpečné hodnoty dotykových i přístupných napětí při provozních i při poruchových stavech jsou uvedeny v normě ČSN EN 50122-1 [41]. Poruchový proud teče přes zemniče do země. Vzniká tak napětí mezi zemniči a neutrální zemí. Účinky provozních i zkratových proudů působí v kolejnicích podélné napětí úměrné proudu. V rámci projektu DC železniční trať je nutno vypočítat potenciál kolejí pro provozní i pro poruchové proudy. Vhodné je také vypočítat potenciál kolejí pro stav, kdy jedna TM je mimo provoz a nenapájí, aby se tím ověřilo, že při uvažovaných vzdálenostech mezi TM nedojde k překročení dovolených napětí.

7.5.2 Ochrana před bludnými proudy

Cílem těchto opatření je zamezení korozních škod na drážních i mimodrážních úložných i ostatních zařízeních (např. kovové části včetně armování tunelů a viaduktů). K tomu je nutno zabezpečit snížení možnosti jejich vzniku a včas identifikovat a odstranit chyby ve ZV a tím přispět k prodloužení životnosti zařízení. Základními faktory pro omezení velikosti bludných proudů je dosažení co nejmenšího podélného úbytku napětí na ZV a dobrá izolace jízdnic kolejnic.



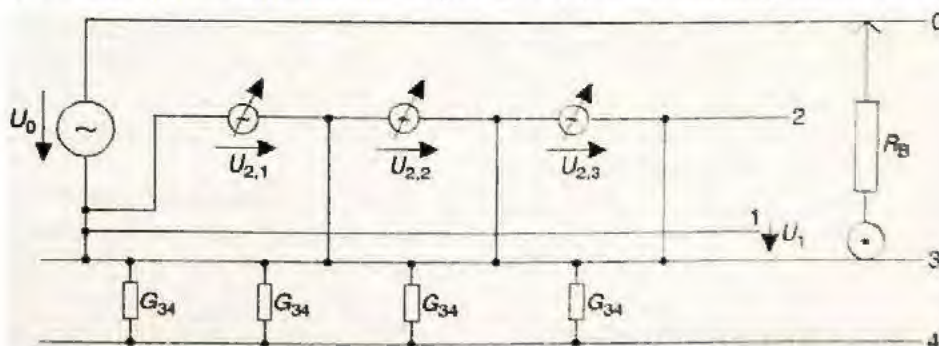
7.6 Aktivní a pasivní zpětný vodič

Pasivní zpětný vodič se běžně používá na nově budovaných, zejména vysokorychlostních AC tratích a jeho použití má tyto hlavní přednosti:

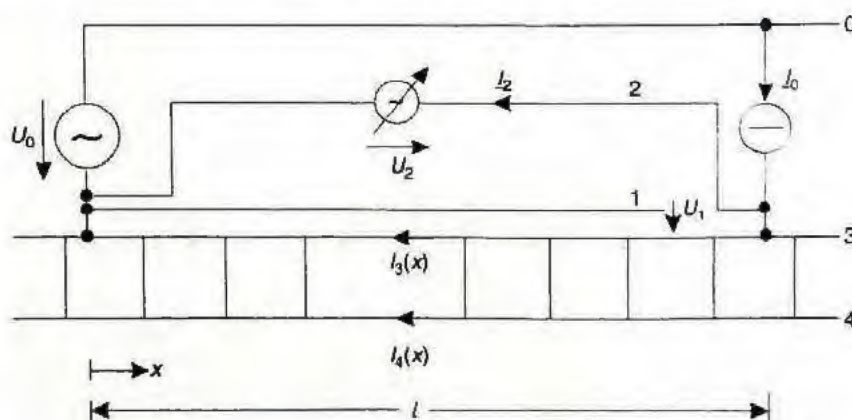
- jednoduché a levné řešení, v kolejiích a v zemi ale zůstává cca 20 % zpětného proudu,
- snížení proudové zátěže v kolejiích a v zemi,
- snížení parazitních indukovaných napětí ve sdělovacích a zabezpečovacích vedeních,
- snížení přístupných a dotykových napětí v blízkosti kolejí,
- pokles magnetického pole v blízkosti tratě,
- zlepšení v oblasti omezení poklesů napětí v trakčním vedení,
- zlepšení elektromagnetické slučitelnosti (EMC) drážních trakčních zařízení a obecně i k vyšší bezpečnosti drážních elektrických zařízení.

Další zlepšení je možné použitím již zmíněných BT a AT. Vždy však zůstává určitý podíl zpětného proudu tekoucího zemí a kolejiemi. Nejmenší podíl zpětného proudu je možno docílit použitím „aktivního zpětného vodiče“, kdy za pomoci výkonové elektroniky je možno snížit podíl zpětného proudu v kolejiích a v zemi cca na 3 %.

Aktivní zpětný proudový vodič umožňuje na AC soustavě udržet podél téměř celého traťového úseku stejné proudové zatížení soustavy kolej – země. Při použití BT a AT není stejné proudové zatížení zajištěno zejména v traťových úsecích, kde se nacházejí činná EHV.



Obr. 83 AC soustava s aktivním zpětným vodičem (0 ... trakční vedení; 1 ... zabezpeč. o sděl. vedení; 2 ... zpětný vodič; 3 ... koleje; 4 ... neutrální země; $U_{2,1}$... napěťový zdroj; U_0 ... napětí NS; U_1 ... řídicí napětí; R_B ... zátěž; G_{34} ... svod kolejí) [43]

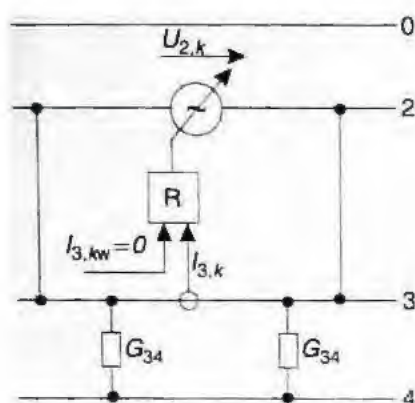


Obr. 84 Schéma jedné smyčky (značení vodičů jako na obr. 83; I_0 ... proud zátěže) [43]

Základní zapojení jednostranně napájeného AC traťového úseku ukazuje obr. 83 a elektrické poměry v jedné smyčce ukazuje obr. 84. Pro zjednodušení je TNS znázorněna jako zdroj napětí

U_0 a zátěž jako ohmický odpor R_B . Hodnota G_{34} reprezentuje svodové poměry mezi kolejnicemi a neutrální zemí. Zpětný vodič je tvořen hliníkovým, méně často měděným lanem vedeným na trakčních podpěrách ve výšce trolejového vedení. Je pravidelně, ve vzdálenostech cca 300 m vodivě spojen s kolejnicovým vedením. Podél kolejí tak vznikají (ze zpětného vodiče a z kolejového vedení) v sérii řazené smyčky, kdy každá smyčka obsahuje řízený napěťový zdroj $U_{2,1} \dots U_{2,m}$, kterými je řízen proud ve zpětném vodiči. Tímto způsobem je možno proudově odlehčit zpětné kolejnicové vedení a neutrální zem.

Regulační obvod je na obr. 85. Regulátor je nastaven tak, aby proud $I_{3,k}$ ve smyčce zmizel. Vlivem dodatečného napětí poklesne výrazně proud zemí. Téměř celý zpětný trakční proud potom teče zpětným lanem.



Obr. 85 Regulace trakčního proudu v k té smyčce (značení vodičů je jako na obr. 83; R ... regulátor proudu) [43]

Vlastnosti aktivního zpětného vodiče je možno objasnit na jednostranně napájeném modelovém traťovém úseku délky 20 km podle obr. 83, 84 a 85.

Tab. 7 Impedance vodičů a parametry kolejí pro soustavu AC 15 kV 16,7 Hz [43]

Impedance vodičů	Hodnota [$\Omega \cdot \text{km}^{-1}$]
Trakční vedení – země	$Z'_{00} = 0,164 + j 0,25$
Zpětný vodič – země	$Z'_{22} = 0,132 + j 0,25$
Koleje – země	$Z'_{33} = 0,039 + j 0,19$
Trakční vedení – sdělovací vedení	$Z'_{01} = 0,016 + j 0,09$
Trakční vedení – zpětný vodič	$Z'_{02} = 0,016 + j 0,12$
Trakční vedení – koleje	$Z'_{03} = 0,016 + j 0,10$
Sdělovací vedení – zpětný vodič	$Z'_{12} = 0,016 + j 0,09$
Sdělovací vedení – koleje	$Z'_{13} = 0,016 + j 0,09$
Zpětný vodič – koleje	$Z'_{23} = 0,016 + j 0,10$
Podélná impedance kolejí	$Z'_{33} = 0,0385 + j 0,1923$
Svod kolejí	$G'_{34} = 3 \text{ S} \cdot \text{km}^{-1}$
Vlnová impedance kolejí	$Z_w = 0,1977 + j 0,1621 \Omega$
Konstanta šíření kolejemi	$\gamma = (0,5932 + j 0,4862) \text{ km}^{-1}$

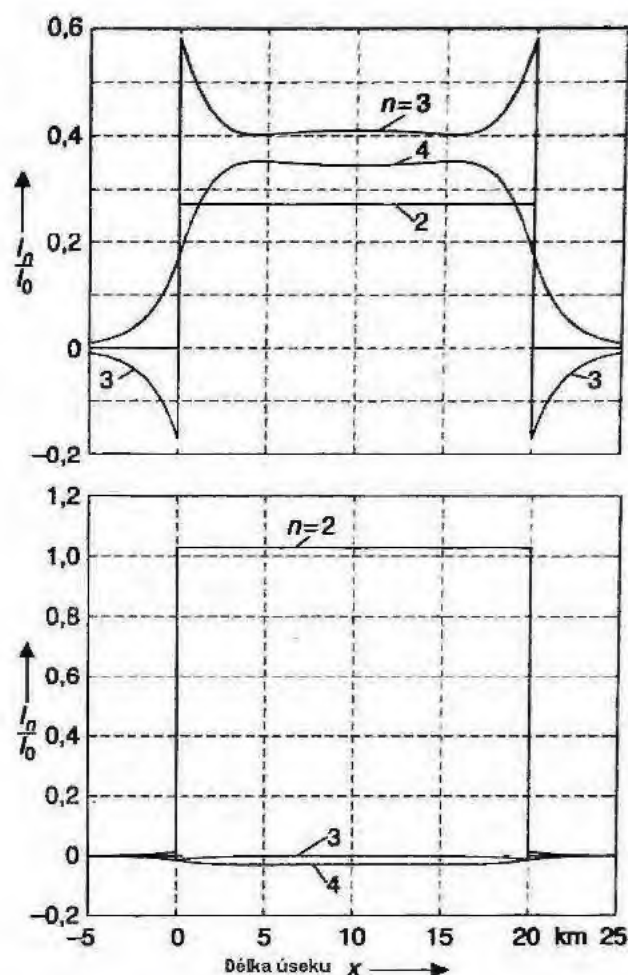
7.6.1 Rozdělení proudů

Koleje a zpětný vodič působí jako kompenzátor. Proud těmito vodiči je možno vypočítat podle [51] dosazením údajů z Tab. 6 do vzorce

$$I_2 = \frac{Z_{02} \cdot Z_{33}}{Z_{22} \cdot Z_{33}} \frac{Z_{03} \cdot Z_{23}}{Z_{23} \cdot Z_{23}} I_0 \quad (4)$$

Jako zemní odpor se uvažuje hodnota $\zeta = 30 \Omega \cdot \text{m}$.

Při aktivním zpětném vodiči je napěťový zdroj (obr. 85) regulován tak, aby uprostřed smyčky zpětného vodiče byl zpětný trakční proud I_3 roven nule. Vlivem řízeného napěťového zdroje se mění v závislosti na I_3 velikost napětí U_{zk} . Tím se mění velikost amplitudy proudu a případně i jeho směr v zemi i v kolejnicích. Zhruba 97 % trakčního proudu teče potom zpětným vodičem.



Obr. 86 Rozdělení zpětných trakčních proudů (značení proudů a vodičů jako na obr. 83), nahoře ... pasivní zpětný vodič; dole ... aktivní zpětný vodič [43]

Obr. 86 ukazuje vypočítané rozdělení proudů jak s pasivním (nahore), tak s aktivním (dole) zpětným vodičem. V prvním případě je napěťový zdroj U_2 nečinný a zpětný proud I_2 potom závisí na vlastní a na vzájemné impedanci vodičů. Podle [51] přejímá pasivní zpětný vodič v tomto případě cca $\frac{I_2}{I_0} \times 100 \approx 27\%$ zpětného trakčního proudu. Ve středu tohoto úseku se

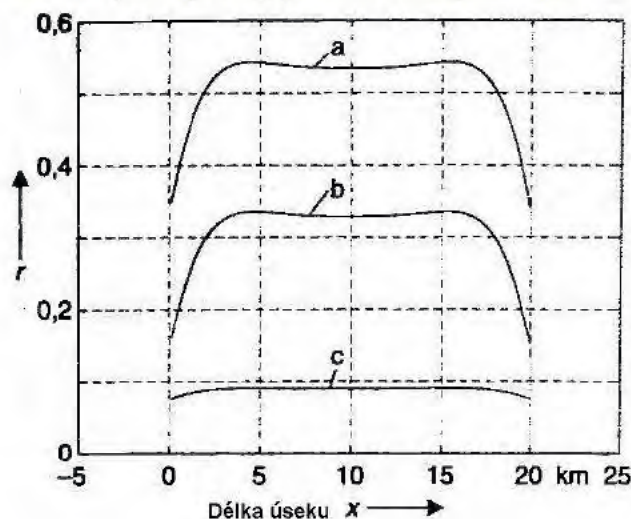
všechny přechodové jevy navzájem vyruší, takže v kolejiž teče $\frac{I_3}{I_0} \times 100 \approx 40\%$ zpětného trakčního proudu a $\frac{I_4}{I_0} \times 100 \approx 33\%$ zpětného trakčního proudu prochází zemí.

Vzhledem k tomu, že proudy je nutno sčítat vektorově, je výsledný součet $I = \frac{I_2 + I_3 + I_4}{I_0} \times 100\%$.

Ve druhém případě je proud tekoucí kolejiž ve středu smyčky podle obr. 84 a obr. 85 (tvořené zpětným vodičem a kolejiž) regulován na „nulu“. Vlivem regulačního napětí U_2 mění zpětný proud svou velikost, případně směr a redukuje tak zpětný trakční proud v kolejiž a v zemi až na cca 3 % původní velikosti.

7.6.2 Redukční faktor

Trakční proudy mohou v souběžných, zejména zabezpečovacích a sdělovacích vedeních (obr. 83 a obr. 84) indukovat rušivá napětí. K maximálnímu ovlivnění dochází v případech, kdy celý zpětný trakční proud teče zemí zpět k napájecí stanici. Koleje a zpětný trakční vodič působí jako kompenzátor těchto rušivých napětí a jejich vliv ukazuje tzv. redukční faktor „r“.



Obr. 87 Redukční faktor pro sdělovací a zabezpečovací kabely (a ... úsek bez zpětného vodiče; b ... úsek s pasivním zpětným vodičem; c ... úsek s aktivním zpětným vodičem) [43]

Obr. 87 ukazuje průběh redukčního faktoru pro naznačené tři případy:

- a) v úseku bez zpětného vodiče $U_{1\max} = Z_{01} \times I_0$
- b) v úseku s pasivním zpětným vodičem $U_1 = r \times U_{1\max} \Rightarrow r = \frac{U_1}{U_{1\max}}$
- c) v úseku s aktivním zpětným vodičem $r = \frac{U_1}{U_{1\max}} = 1 - \frac{Z_{12} \cdot I_2}{Z_{01} \cdot I_0} - \frac{Z_{13} \cdot I_3}{Z_{01} \cdot I_0}$

- V úseku bez zpětného vodiče působí jediný vodič – koleje, jako kompenzátor. Uprostřed úseku dosahuje redukční faktor hodnoty $r = 0,53$, protože zde zemí teče většina zpětného proudu. Na koncích úseku (v místě odběru a v místě napájení) teče většina zpětného trakčního proudu kolejemi a dochází zde k podstatnému snížení redukčního faktoru.
- V úseku s pasivním zpětným vodičem se sníží redukční faktor na $r = 0,33$.
- V úseku s aktivním zpětným vodičem dojde k dalšímu snížení až na $r = 0,09$.

Při správném nastavení regulačního zdroje U_2 se značně zjednoduší, případně se úplně odstraní požadavky na ochranné stínění ohrožených vodičů.

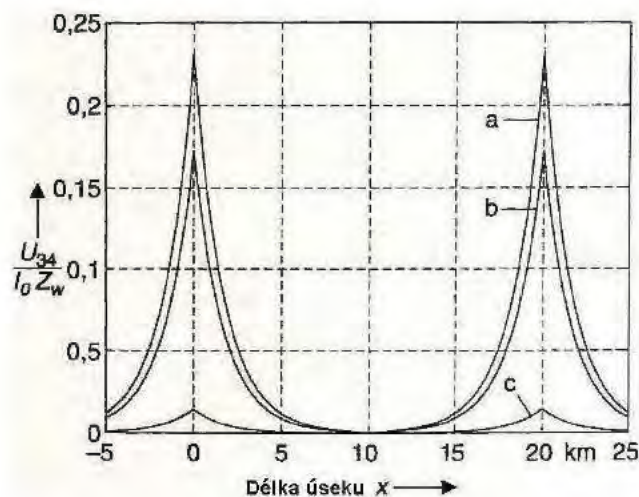
7.6.3 Napětí kolej – země

Při provozu elektrizované tratě vzniká napětí mezi zemí a kolejnicemi. Zcela logicky vzniká nejvyšší napětí v místech, kde zpětný proud vstupuje nebo vystupuje z kolejnic.

Dotykové i přístupné napětí se počítá podle obr. 88) v délce napájeného úseku $0 < x < l$ [51].

$$Z_{str} = Z_{00} \frac{Z_{03}^2}{Z_{33}} + \frac{(Z_{33} - Z_{03})^2}{Z_{33}} \times \frac{1 - e^{-\gamma l}}{\gamma l} \quad (5)$$

kde Z_{str} je impedance úseku [Ω]



Obr. 88 Napětí koleji proti zemi (a ... úsek bez zpětného vodiče; b ... úsek s pasivním zpětným vodičem; c... úsek s aktivním zpětným vodičem) [43]

Maximální hodnotu tohoto napětí v délce sledovaného úseku udává obr. 88, výraz:

$$\left[\frac{U_{34}}{I_0 \cdot Z_W} \right] \quad (5)$$

kde U_{34} je napětí na svodovém odporu kolejnic [V]

I_0 trakční proud [A]

Z_W vlnová impedance [Ω]

v úseku bez zpětného vodiče nabývá hodnotu 0,23 Ω ,

v úseku s pasivním zpětným vodičem nabývá hodnotu 0,17 Ω ,

v úseku s aktivním zpětným vodičem nabývá hodnotu 0,015 Ω .

Použitím zpětného vodiče se sníží impedance. V uvažovaném 20 km dlouhém úseku dostaneme po zaokrouhlení následující hodnoty:

Tab. 8 Impedance vedení v závislosti na zpětném trakčním vodiči

Způsob vedení zpětného trakčního proudu	Impedance úseku Z_{str}
Trakční vedení bez zpětného vodiče	$0,16 + j 0,19 \Omega.km^{-1}$
Trakční vedení s pasivním zpětným vodičem	$0,16 + j 0,17 \Omega.km^{-1}$
Trakční vedení s aktivním zpětným vodičem	$0,15 + j 0,13 \Omega.km^{-1}$

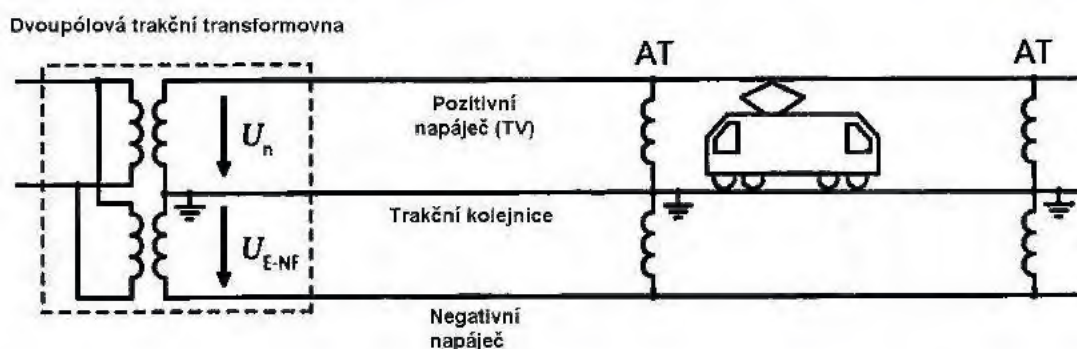
7.7 Současná řešení s použitím autotransformátorů

Při napájení AC tratí se používají převážně dva systémy napájení:

- konvenční jednonapěťový systém bez přídavného zpětného vodiče nebo s tímto vodičem. Tento systém bývá označován jako „RT systém“,
- vícenapěťový systém, častěji nazývaný jako autotransformátorový nebo také „AT“ systém. Tento systém je možno dělit tzv. „AT-systém pravý“, obr. 89 a na „AT-systém nepravý“, obr. 90.

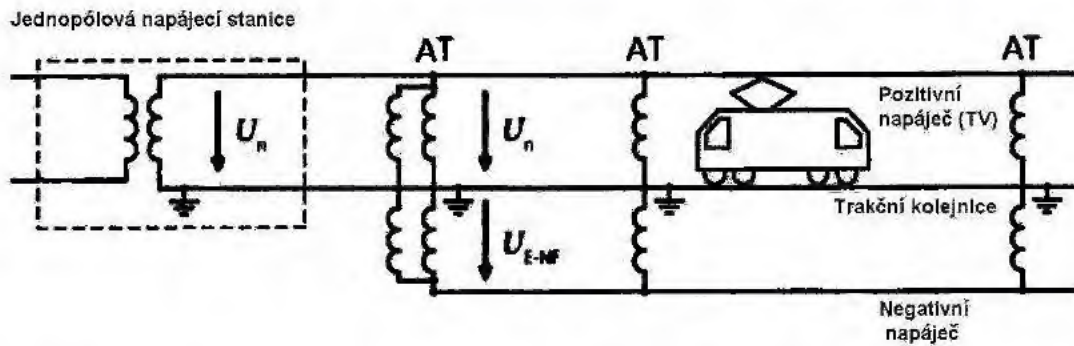
V některých případech jsou používány také odsávací transformátory – tzv. booster nebo BT-systém. Tento systém je užíván podle uvážení tam, kde např. pro špatné půdní podmínky vzniká výrazné nebezpečí parazitních jevů elektrické trakce. Obecně samozřejmě platí, že varianta zvolená k realizaci, musí plnit stanovené funkční požadavky při minimálních investičních i provozních nákladech. Nová řešení se neuplatňují jen při výstavbě nových tratí, ale i při rekonstrukci tratí stávajících.

Na obr. 89 (AT-systém pravý) je v TNS použit jednofázový trakční transformátor se dvěma sekundárními vinutími navzájem otočenými o 180° . Uzel těchto vinutí je spojen se zemí a s kolejemi. Jedno vinutí napájí trolejové vedení (někdy je označováno jako „pozitivní napáječ“, druhé vinutí napájí „negativní napáječ“. Ve vzdálenostech cca 35 km (na soustavě 2 AC 15 kV 16,7 Hz) jsou umístěny autotransformátorové stanice. Při tomto systému je možno podstatně prodloužit délku napájeného úseku. Prakticky veškerý zpětný proud teče negativním napáječem.



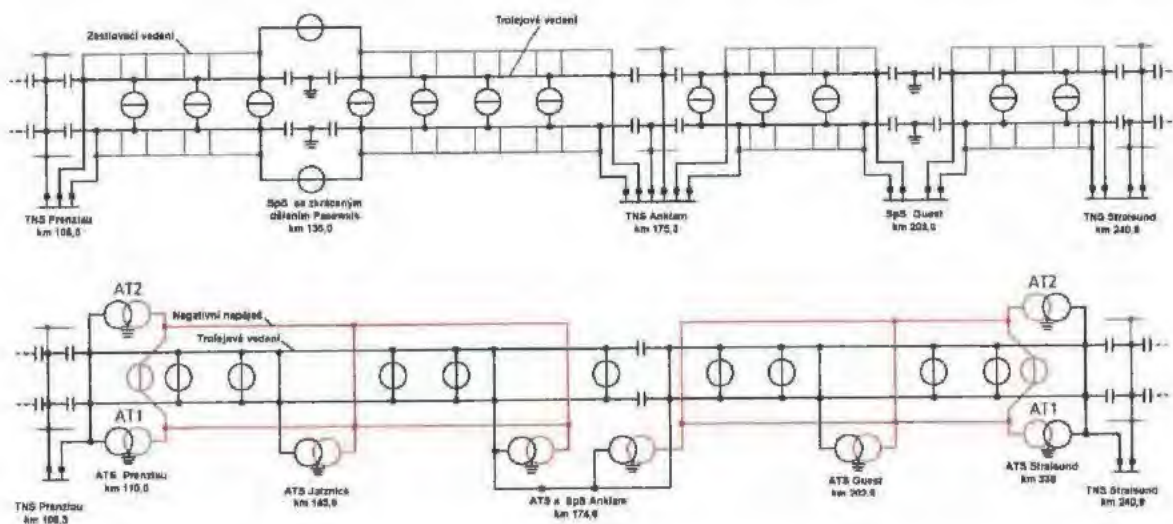
Obr. 89 Klasické zapojení systému s autotransformátory (2 AC 15 kV 16,7 Hz nebo 2 AC 25 kV 50 Hz) – AT ... autotransformátor; U_n ... jmenovité napětí; U_{NF} ... Napětí negativní napáječ – země [43]

Na obr. 90 (nepravý AT systém) je trakční vedení napájeno jednopólově z konvenční TNS. Napětí pro negativní napáječ se získá v první AT stanici (umístěné v tomto případě na trati v blízkosti TNS).



Obr. 90 Autotransformátorový systém s jednofázovou trakční transformovnou (značení jako obr. 89) [43]

Na obr. 91 je příklad použití nepravého AT systému při modernizaci úseku Prenzlau – Stralsund. Trať je dvoukolejná, 133 km dlouhá. V původním provedení byla napájena třemi TNS (Prenzlau, Anklam a Stralsund) a v celé délce byla vybavena zesilovacími vedeními. Protože prostřední TNS Anklam byla již na konci životnosti, vyvstala otázka, zda tuto TNS rekonstruovat nebo zda použít jiné řešení. Provedené simulace potvrdily možnost přestavby na nepravý systém 2 AC 15 kV 16,7 Hz. Koncové napájení tohoto úseku je nyní zabezpečeno ze stávajících jednofázových TNS Prenzlau a Stralsund. V obou TNS byl zvýšen výkon. TNS Anklam byla zrušena a stávající zesilovací vedení bylo využito jako negativní napáječ. Podél trati bylo vybudováno pět AT stanic (30/15 kV), z nich AT stanice v km 110,0 a 238,0 byly pro zajištění dostatečného zabezpečení výkonu vybaveny dvojnásobným počtem AT transformátorů. Koncepti přestavby, vývoj, projekt, stavební práce i uvedení do provozu provedly společně DB AG a firma Balfour Beatty.



Obr. 91 Koncept nového způsobu napájení úseku Prenzlau–Stralsund (nahore ... konvenční systém se zesilovacími vedeními; dole ...vícenapětový systém s autotransfornátory) [43]



Kontrolní otázky:

- 7.1 Co představuje pojem nepřímé uzemnění trakční soustavy ?
- 7.2 Jakým způsobem je řešeno zpětné vedení pro AC tratě a DC tratě ?
- 7.3 Co znamená aktivní a pasivní zpětný vodič ?
- 7.4 Co představuje redukční faktor ?
- 7.5 Jaké je zapojení systému s AT (pravý/nepravý systém) ?

8 PODMÍNKY PŘIPOJENÍ NA DISTRIBUČNÍ SÍŤ

Klíčová slova:

Trakční soustava, připojovací podmínky, napětí, kmitočet, napájecí stanice, spínací stanice.



Cíl studia:

Seznámení studenta s připojovacími podmínky odběrných zařízení z trakčních proudových soustav DC 1,5 kV, DC 3 kV, AC 25 kV 50 Hz, požadavky na napětí a kmitočet těchto trakčních soustav a se základními požadavky na elektrické napájecí a spínací stanice.



8.1 Podmínky připojení



8.1.1 Připojovací podmínky odběrných zařízení z trakčních proudových soustav DC 1,5 kV, DC 3 kV, AC 25 kV 50 Hz

Odběrná zařízení elektrické trakce všeobecně jsou:

- pohyblivá elektrická zařízení, připojená k trakčnímu vedení sběračem proudu – EHV dopravců,
- pevná elektrická zařízení, připojená k trakčnímu vedení přes spínací (odpojovací) zařízení – systémy EPZ (elektrické předtápěcí zařízení).

Připojení těchto zařízení k trakčnímu vedení není považováno za odběrné místo ve smyslu energetického zákona č. 458/2000 Sb. v platném znění. Vlastní odběrné místo zajišťující připojení těchto zařízení je realizováno na trakční napájecí stanici – odběrné místo elektrické trakce. Odběrné místo elektrické trakce zajišťuje připojení a odběr elektřiny pro všechna pohyblivá a pevná elektrická zařízení v daném napájecím úseku trakční proudové soustavy. Parametry odběru odběrných zařízení elektrické trakce musí odpovídat ČSN EN 50163. Zařízení, vybudovaná před účinností této evropské normy, odpovídají ČSN 34 1500. Požadavky na odběrné místo na trakční napájecí stanici se řídí energetickým zákonem, souvisejícími vyhláškami a technickými normami. Obecně platí, že odběrná zařízení, připojená k trakčnímu vedení, nejsou vybavena měřením spotřeby elektrické energie. Měření spotřeby elektrické energie je realizováno až na odběrném místě elektrické trakce, jeho provedení se řídí energetickým zákonem a jeho doprovodnými vyhláškami.

8.2 Napětí a kmitočet trakčních soustav [52]

Dle ČSN EN 50163 ed. 2 - Drážní zařízení - Napájecí napětí trakčních soustav, s. 9,10; odstavec 4.

8.2.1 Napětí

Tab. 9 Jmenovitá napětí a jejich přípustné mezní hodnoty a doby trvání

Elektrizační soustava	Nejnižší krátkodobé napětí $U_{\min 2}$ V	Nejnižší trvalé napětí $U_{\min 1}$ V	Jmenovité napětí U_n V	Nejvyšší trvalé napětí $U_{\max 1}$ V	Nejvyšší krátkodobé napětí $U_{\max 2}$ V
DC (střední hodnoty)	400 500 ^c 1 000 2 000	400 500 1 000 2 000	600 ^a 750 1 500 3 000	720 900 ^c 1 800 ^c 3 600	800 1 000 1 950 3 900 ^b
AC (efektivní hodnoty)	11 000 17 500 ^c	12 000 19 000 ^c	15 000 25 000	17 250 27 500 ^c	18 000 29 000

Zvláštní národní podmínky pro Francii – příloha B normy.

^a Nově plánované trakční soustavy DC pro tramvaje a místní dráhy mají odpovídat jmenovitému napětí soustavy 750 V, 1 500 V nebo 3 000 V.

^b Zvláštní národní podmínky pro Belgie – viz příloha B normy.

^c Zvláštní národní podmínky pro Spojené království – viz příloha B normy.

Musejí být splněny následující požadavky:

- doba trvání napětí mezi $U_{\min 1}$ a $U_{\min 2}$ nesmí být delší než 2 min,
- doba trvání napětí mezi $U_{\max 1}$ a $U_{\max 2}$ nesmí být delší než 5 min,
- napětí naprázdno na sběrnících napájecí stanice musí být nižší nebo rovno $U_{\max 1}$. Pro DC napájecí stanice je přípustné, aby toto napětí naprázdno bylo nižší nebo rovno $U_{\max 2}$ s tím, že pokud je vlak připojen, napětí na jeho pantografu musí být v souladu s tabulkou a jejími požadavky,
- za normálních provozních podmínek musí být napětí v rozmezí $U_{\min 1} \leq U \leq U_{\max 2}$,
- za mimořádných provozních podmínek nesmějí napětí v rozmezí $U_{\min 2} \leq U \leq U_{\min 1}$ uvedená v tabulce způsobit žádné škody ani poruchy;
- pokud je dosaženo hodnot napětí mezi $U_{\max 1}$ a $U_{\max 2}$, musí na nestanovenou dobu následovat úroveň nižší nebo rovna $U_{\max 1}$.
Hodnot napětí mezi $U_{\max 1}$ a $U_{\max 2}$ smí být dosahováno pouze při krátkodobých stavech jako je:
 - rekuperační brzdění
 - přepínání u systémů pro regulaci napětí jako u mechanického přepínače odboček;
- nejnižší provozní napětí: za mimořádných provozních podmínek je $U_{\min 2}$ nejnižší mezní hodnota napětí trakčního vedení, při níž mají drážní vozidla pracovat.

8.2.2 Kmitočet

Kmitočet 50 Hz elektrické trakční soustavy je dán trojfázovou sítí. Proto platí hodnoty uvedené v EN 50160. Kmitočet 16,7 Hz elektrické trakční soustavy (s výjimkou synchronních měničů) není dán trojfázovou rozvodnou sítí.

Za normálních provozních podmínek musí střední hodnota základního kmitočtu, měřená po dobu 10 s, odpovídat rozsahu vn napájecí sítě:

- u soustav se synchronním připojením k propojené soustavě:

50 Hz \pm 1 % v 99,5 % roku

50 Hz + 4 % / - 6% ve 100 % doby

- u soustav bez synchronního připojení k propojené soustavě (např. napájecí soustavy na některých ostrovech):

50 Hz ± 2 %	v 95 % týdne
50 Hz ± 15 %	ve 100 % doby

U trakční soustavy 16,7 Hz tyto hodnoty jsou:

- u soustav se synchronním připojením k propojené soustavě:

16,7 Hz ± 1 %	v 99,5 % roku
16,7 Hz ± 6%	ve 100 % doby

- u soustav bez synchronního připojení k propojené soustavě (např. napájecí soustavy na některých ostrovech):

16,7 Hz ± 2 %	v 95 % týdne
16,7 Hz ± 15%	ve 100 % doby

- u soustav propojených s drážní propojenou sítí 16²/₃ Hz:

16,7 Hz + 2 % / -3 %	ve 100 % doby.
----------------------	----------------

8.3 Obecné základní předpisy

8.3.1 Základní požadavky na elektrické napájecí a spínací stanice

Všeobecně [34]

Trakční napájecí stanice slouží k napájení elektrických drážních vozidel prostřednictvím trolejového vedení [53] a dále pro napájení provozně důležitých zařízení zajišťující bezpečné provozování dráhy a drážní dopravy. Uspořádání elektrických zařízení trakční napájecí stanice je nutno navrhovat a provozovat tak, aby bylo možno toto zařízení obsluhovat, udržovat a kontrolovat bez nebezpečí úrazu osob nebo poškození zařízení.

Všechna použitá zařízení musí být umístěna tak, aby byly všude dodrženy požadované vzdušné vzdálenosti a bezpečné vzdálenosti podle ČSN EN 50110-1 ed. 2, ČSN EN 50122-1, ČSN EN 50124-1, ČSN EN 50124-2, ČSN 33 3201, ČSN 33 3210, ČSN 33 3220 a norem přidružených.

Všechna použitá zařízení musí kromě této normy vyhovovat příslušným předpisům a předmětovým normám, které pro daná zařízení obsahují podrobnější ustanovení.

Trakční napájecí stanice musí být vybavena osobními ochrannými pomůckami a pracovními prostředky podle rozsahu napájecí stanice a prováděných činností. Vybavení trakční napájecí stanice osobními ochrannými pomůckami a pracovními prostředky stanoví a zajistí vlastník nebo jím pověřený správce zařízení interním opatřením.

Pracovní podmínky a prostředí pro zařízení v trakčních napájecích a spínacích stanicích musí vyhovovat ustanovením ČSN 33 2000-3 a ČSN 33 3220.

8.3.2 Rozhodující stroje, přístroje a zařízení [54]

Vypínače vvn, vn

Použité vypínače musí odpovídat ČSN 35 4205 a ČSN 35 4220, vypínače vn ještě ČSN 34 1500.

Odpojovače vvn, vn

Použité odpojovače musí odpovídat ČSN 35 4205 a ČSN EN 60129 +A1 (35 4210) odpojovače vn ještě ČSN 34 1500.

Rozváděče vn

Skříňové rozváděče musí vyhovovat ČSN 35 4205 a ČSN EN 60298 (35 7181), otevřená rozvodná zařízení vn ČSN 33 3231 [55] a ČSN 34 1500.

Transformátory

Transformátory musí odpovídat ČSN 35 1100 a normám k ní přidruženým. Transformátory pro jednofázovou trakční proudovou soustavu a transformátory usměrňovačových soustrojí trakčních měnících musí dále odpovídat ČSN 34 1500.

Stanoviště transformátorů musí odpovídat ČSN 33 3240.

Přístrojové transformátory

Musí odpovídat ČSN 35 1360.

Ochrany, místní automatiky a měření

Vybavení STZ ochranami, místními automatikami a měřením musí odpovídat ČSN 33 3505, ČSN 33 3051, ČSN 33 3260, ČSN 38 1009 a služební rukověti SR 34 (E). Místní automatiky a měření musí být kompatibilní se systémem ústředního a dálkového řízení.

Rozvodna (rozdávěč) stejnosměrného proudu

Musí odpovídat ČSN 34 1500 a ČSN 33 3505.

Rychlovypínače

Musí odpovídat ČSN 34 1500 a ČSN 33 3505.

Zásady modernizace ŽDC [56]

K 1. 5. 2004 se Česká republika stala členem Evropské unie, jejíž Evropský parlament a Rada v zájmu zlepšení vzájemného propojení národních železničních sítí přijaly směrnice o interoperabilitě transevropského vysokorychlostního a konvenčního železničního systému. Vybraná železniční síť České republiky, tvořící součást evropského železničního systému musí splňovat požadavky na interoperabilitu podle Vyhlášky č. 352/2004 Sb. o provozní a technické propojenosti evropského železničního systému, Nařízení vlády o technických požadavcích na provozní a technickou propojenost evropského železničního systému č. 133/2005 Sb. a příslušných technických specifikací interoperability.

Pro stanovení jednotné koncepce a technického řešení železniční infrastruktury byly zpracovány „Zásady modernizace a optimalizace vybrané železniční sítě České republiky“, následně novelizovány Směrnicí generálního ředitele SŽDC č. 16/2005, ve které jsou zohledněny legislativní změny platné ke dni účinnosti této směrnice mající vliv na koncepci a technické řešení železniční infrastruktury.

Kontrolní otázky:

- 8.1 Jaké jsou přípojovací podmínky odběrných zařízení z trakčních proudových soustav DC 1,5 kV, DC 3 kV, AC 25 kV 50 Hz ?
- 8.2 Jaké jsou požadavky na napětí a kmitočet těchto trakčních soustav ?
- 8.3 Jaké jsou základní požadavky na elektrické napájecí a spínací stanice ?



SEZNAM ZKRATEK

AC	alternating current
AT.....	autotransformátor
ATS	autotransformátorové stanice
BT.....	booster transformátor
ČD	České dráhy
ČR.....	Česká republika
ČSN	Česká státní norma
DB	Deutsche Bahn
DC	direct current
DS.....	distribuční soustava
EHV.....	elektrické hnací vozidlo
EMC	elektromagnetická kompatibilita
EPZ.....	elektrické předtápěcí zařízení
EU.....	Evropská unie
FKZ	filtračně kompenzační zařízení
IED	inteligentní elektronické zařízení
MTP.....	měřicí transformátor proudu
MTU.....	měřicí transformátor napětí
nn.....	nízké napětí
RZK.....	rozvaděč zpětných kabelů
SNCF.....	Société Nationale des Chemins de fer Français
SpS	spínací stanice
SŽDC.....	Správa železniční dopravní cesty
TEN-T	transevropská dopravní síť
TM.....	trakční měnírna
TM.....	trakční měnírna
TNS	trakční napájecí stanice
TT	trakční transformovna
vn.....	vysoké napětí
vvn.....	velmi vysoké napětí

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Polopantograf [6]	15
Obr. 2	Sběrač pro spodní odběr z třetí kolejnice [6]	15
Obr. 3	Příklad přehledového schématu TM pro napájení tramvají [7]	17
Obr. 4	Schéma diodové tramvajové TM včetně rozvaděče zpětných kabelů [7]	18
Obr. 5	Schéma tyristorové měničky, včetně RZK [7]	19
Obr. 6	Schéma napájecí stanice v ŘS Pražského metra [8]	20
Obr. 7	Trakční transformátor 1000 kVA, 22/0,65 kV [10]	21
Obr. 8	Příklad výsuvného usměrňovače pro TM metra (ČKD ELEKTROTECHNIKA, a.s.) [10]	22
Obr. 9	Skříňový rozvaděč EZB 750 V DC části TNS, vpravo detail pole napáječe [11]	23
Obr. 10	Odpojovače (klasický v měničce, úsekový pod krytem – metro) [12]	24
Obr. 11	Úsekové odpojovače trolejového vedení [13]	25
Obr. 12	Vakuový vypínač VD4 firmy ABB, s.r.o. [14]	25
Obr. 13	Detail vypínací části VD4 [14]	26
Obr. 14	Rychlovypínač Un 750 V MEP Postřelmov [15]	27
Obr. 15	Ukázka zobrazení panelu poruch v ŘS metro Praha [8]	29
Obr. 16	Růžková bleskojistka [11]	29
Obr. 17	Omezovač přepětí PSP 1/10/III [16]	29
Obr. 18	Omezovač nízkého napětí HL120 [16]	29
Obr. 19	Princip činnosti APS [17]	30
Obr. 20	Místo napájení APS [17]	31
Obr. 21	Schéma řízení výkonu jednoduchých trakčních DC motorů [18]	33
Obr. 22	Měnič UKTB-2x3M-01516 [10]	34
Obr. 23	Vzduchová tlumivka TLV [10]	34
Obr. 24	Schéma DC části měničky [19]	35
Obr. 25	Rozvaděč měničny TNS (Sécheron) [19]	35
Obr. 26	Růžkový trakční odpojovač [11]	36
Obr. 27	Trakční odpojovač s uzemňovačem [11]	36
Obr. 28	Napětí napájecích soustav železničních sítí [25]	39
Obr. 29	Železniční síť ČR [25]	39
Obr. 30	Převozná měnična [12]	40
Obr. 31	Schéma TNS rozvodna 110 kV [26]	41
Obr. 32	Schéma TNS rozvodna 22 kV [26]	42
Obr. 33	Schéma TNS rozvodna 6 kV [26]	42
Obr. 34	Schéma TNS rozvodna 3 kV [26]	43
Obr. 35	Štítek transformátoru ABB RESIBLOC včetně zapojení [8]	43

Obr. 36	Venkovní skříňové provedení suchého trakčního transformátoru ČKD [8]	44
Obr. 37	Dva pohledy na vozík skříňového měniče – zezadu jsou nahoře dobře viditelné chladiče diodového bloku a dole kontaktní hlavice silového připojení [10]	45
Obr. 38	Skříňový usměrňovač EZB [11].....	45
Obr. 39	Skříňový rozváděč EZB [11]	46
Obr. 40	Odpojovač QAK vnitřní provedení [27]	47
Obr. 41	Odpojovač QAD venkovní provedení [27].....	47
Obr. 42	Ukázka zobrazení panelu poruch TM v ŘS ČD [8]	49
Obr. 43	Schéma napájecí soustavy AC 15 kV 16,7 Hz [8]	51
Obr. 44	Trakční transformátor 15 MW, 120/17,25 kV typ hermetik pro Deutsche Bahn [17].....	51
Obr. 45	Rotační frekvenční měnič [29].....	52
Obr. 46	Statický frekvenční měnič [29]	52
Obr. 47	Schéma statického měniče 3AC 50 Hz/1AC 16,7 Hz [29]	53
Obr. 48	Trakční frekvenční měnič PSC 6000 Rail (ABB) [30]	54
Obr. 49	TM pro napájení trakční sítě 16,7 Hz (Norimberk) [31].....	54
Obr. 50	Schéma rozvodny 110 kV (zapojení „H“) [26].....	58
Obr. 51	Schéma části rozvodny 27 kV [26]	58
Obr. 52	Schéma spínací stanice AC 25 kV 50 Hz [26].....	59
Obr. 53	Schéma zapojení FKZ [26]	60
Obr. 54	Připojení trakčních transformátorů 110/27 kV na energetickou síť a trakční vedení při zapojení vstupního vinutí do „T“ [34]	62
Obr. 55	Připojení trakčních transformátorů 110/27 kV na energetickou síť a trakční vedení při zapojení vstupního vinutí do „V“ [34].....	62
Obr. 56	Skříňový rozváděč TT 27 kV [26]	63
Obr. 57	Detail přívodního pole skříňového rozváděče [26].....	63
Obr. 58	Odpojovač QAD 35 [37].....	64
Obr. 59	Odpínač OJC-Ž [38].....	64
Obr. 60	Jednopolový vakuový vypínač vnitřní 27,5 kV – 5 CVD-02712 [39].....	64
Obr. 61	Jednopolový vakuový vypínač venkovní 27,5 kV – 1 CVD-02712 [39].....	64
Obr. 62	Nadzemní vedení 2 × 25 kV [25].....	67
Obr. 63	Schéma AT-2U s plným rozsahem napájecího napětí. Trakční transformátor se dvěma sekundárními vinutím [27].....	68
Obr. 64	Schéma AT-1U (zjednodušená AT soustava) s napájením trolejového vodiče. Trakční transformátor s jedním sekundárním vinutím [27]	68
Obr. 65	Schéma BT se zpětným vodičem soustav [27].....	68
Obr. 66	Typická konfigurace zapojení napájecí soustavy 2 AC 25 kV [40].....	69
Obr. 67	Trakční transformátor pro síť 2 × 25 kV [25]	69
Obr. 68	Autotransformátor (železnice SNCF - Francie) [17].....	70

Obr. 69	Průběh napětí v okolí tratě [43]	71
Obr. 70	Prostor sběrače a prostor trakčního vedení podle ČSN EN 50121-1 [44]	73
Obr. 71	Schéma uzemnění na elektrických tratích: DC soustava (nahore), AC soustava (dole) [43].....	74
Obr. 72	Cesta zpětného proudu na AC soustavě kolejemi bez dalších zpětných vodičů [43].....	75
Obr. 73	Cesta zpětného proudu na AC soustavě s AT [43]	75
Obr. 74	Cesta zpětného proudu na AC soustavě s BT [43].....	76
Obr. 75	Schéma BT [43].....	76
Obr. 76	Rozdělení proudů podél trati. Nahore zpětný vodič bez BT, dole zpětný vodič s BT (1- trakční vedení, 2 - zpětný vodič, 3 - proud zemi) [43].....	77
Obr. 77	Zpětné vodiče a jejich příčná propojení v mezistaničních úsecích [43]	78
Obr. 78	Průběh napětí na kolejnicích v závislosti na vzdálenosti od TNS: 1 ... [U'] při konstantním trakčním odběru; 2 ... [U] při zkratu; 3 ... [I _k] průběh zkratového proudu [43].....	79
Obr. 79	Schéma vedení zpětného proudu a uzemnění [43].....	80
Obr. 80	Schéma vedení zpětného proudu a uzemnění v trakční transformovně [43]	81
Obr. 81	Ochrana silničních mostů křižujících železniční trať [43].....	82
Obr. 82	Ochrana silničních mostů křižujících železniční trať [43].....	84
Obr. 83	AC soustava s aktivním zpětným vodičem (0 ... trakční vedení; 1 ... zabezpeč. a sděl. vedení; 2 ... zpětný vodič; 3 ... koleje; 4 ... neutrální země; U _{2,1} ... napěťový zdroj; U ₀ ... napětí NS; U ₁ ... řídicí napětí; R _B ... zátěž; G ₃₄ ... svod kolejí) [43].....	85
Obr. 84	Schéma jedné smyčky (značení vodičů jako na obr. 83; I ₀ ... proud zátěže) [43].....	85
Obr. 85	Regulace trakčního proudu v k-té smyčce (značení vodičů je jako na obr. 83; R ... regulátor proudu) [43].....	86
Obr. 86	Rozdělení zpětných trakčních proudů (značení proudů a vodičů jako na obr. 83), nahore ... pasivní zpětný vodič; dole ... aktivní zpětný vodič) [43].....	87
Obr. 87	Redukční faktor pro sdělovací a zabezpečovací kabely (a ... úsek bez zpětného vodiče; b ... úsek s pasivním zpětným vodičem; c ... úsek s aktivním zpětným vodičem) [43].....	88
Obr. 88	Napětí kolejí proti zemi (a ... úsek bez zpětného vodiče; b ... úsek s pasivním zpětným vodičem; c... úsek s aktivním zpětným vodičem) [43].....	89
Obr. 89	Klasické zapojení systému s autotransfornátory (2 AC 15 kV 16,7 Hz nebo 2 AC 25 kV 50 Hz) – AT ... autotransfornátor; U _n ... jmenovité napětí; U _{NF} ... Napětí negativní napáječ – země [43]	90
Obr. 90	Autotransfornátorový systém s jednofázovou trakční transformovnou (značení jako obr. 89 [43].....	91
Obr. 91	Koncept nového způsobu napájení úseku Prenzlau–Stralsund (nahore ... konvenční systém se zesilovacími vedeními; dole ... vícenapěťový systém s autotransfornátory) [43]	91

SEZNAM TABULEK

Tab. 1	Přehled vyráběných typů trakčních měničů ČKD Elektrotechnika, a.s.	34
Tab. 2	Rychlovyvínače pro 1,5 kV DC (Vybrané technické parametry)	36
Tab. 3	Technické parametry usměrňovacího bloku EZB U 3 kV (EŽ Praha, a.s.)	45
Tab. 4	Technické parametry PSC 600 Rail (ABB)	53
Tab. 5	Technické parametry Sitras FSC plus (Siemens)	54
Tab. 6	Dovolená přístupná a dotyková napětí	79
Tab. 7	Impedance vodičů a parametry kolejí pro soustavu AC 15 kV 16,7 Hz [43]	86
Tab. 8	Impedance vedení v závislosti na zpětném trakčním vodiči	90
Tab. 9	Jmenovitá napětí a jejich přípustné mezní hodnoty a doby trvání	94

LITERATURA

- [1] ČSN 33 3510: Elektrotechnické předpisy. Elektrická trakční zařízení metra, ČNI, účinnost 05/1985
- [2] Jansa F.: Elektrická trakční zařízení I., VŠDS, Žilina, 1968
- [3] Horák K. a kol. : Energetika a trakce, ALFA, Bratislava, 1983
- [4] ČSN 33 3516: Předpisy pro trakční vedení tramvajových a trolejbusových drah, ČNI, účinnost 7/1997
- [5] ČSN 33 3525: Trakční vedení metra. ČNI, účinnost 8/1997
- [6] <http://cs.wikipedia.org/>, [on line 7.7.2014]
- [7] Interní materiály, Dopravní podnik hl. m. Prahy, akciová společnost
- [8] Štos, J.: Ročníkový projekt I., 2014
- [9] ČSN EN 50 329: Drážní zařízení - Pevná trakční zařízení - Trakční transformátory, ČNI, účinnost 10/2003
- [10] <http://www.ckde.cz/>, [on line 7.7.2014]
- [11] <http://www.elzel.cz/>, [on line 7.7.2014]
- [12] <http://metroweb.cz/>, [on line 11.7.2014]
- [13] <http://motor.feld.cvut.cz/www/materialy/AD1M14PO2>, [on line 11.7.2014]
- [14] <http://www.vfservis.cz/>, [on line 23.7.2014]
- [15] <http://www.sub.cz/mep-postrelmov/>, [on line 24.7.2014]
- [16] <http://katalog.hakel-trade.cz/>, [on line 24.7.2014]
- [17] <http://www.alstom.com/>, [on line 28.7.2014]
- [18] <http://www.railway-technical.com/>, [on line 28.7.2014]
- [19] <http://dl.secheron.com/>, [on line 28.7.2014]
- [20] <http://www.bueker.net/trainspotting/>, [on line 6.8.2014]
- [21] Duchoň M., Ibl J., Křivánek J.: Dráhové měřírny, Dopravní nakladatelství Praha, 1960
- [22] Horák, K. a kol.: Napájení elektrizovaných železnic, Nadas Praha, 1989
- [23] Doleček, R.: Napájení elektrických drah, 2012, Univerzita Pardubice, DFJP
- [24] Doleček, R.: Energetika kolejové dopravy, 2012, Univerzita Pardubice, DFJP
- [25] <http://www.railelectrica.com/>, [on line 6.8.2014]
- [26] Interní materiály SŽDC
- [27] <http://www.banekonference.dk/>, [on line 12.8.2014]
- [28] ČSN 33 3230: Elektrotechnické předpisy. Rozvodny trojfázové pro napětí nad 52 kV, ČNI, účinnost 09/1983 - 08/2014
- [29] <http://library.abb.com/>, [on line 20.8.2014]
- [30] <http://www05.abb.com/>, [on line 22.8.2014]
- [31] <http://www.mobility.siemens.com/>, [on line 23.8.2014]
- [32] Pokyn generálního ředitele SŽDC č. 14/2008 (ve znění změn č. 1 až 5 s účinností od 20. 1. 2014)

- [33] Hlava, K: Elektromagnetická kompatibilita drážních zařízení, Univerzita Pardubice, 2004
- [34] ČSN 33 3505: Drážní zařízení – Pevná trakční zařízení – Základní požadavky na elektrické napájecí a spínací stanice, ČNI, účinnost 4/2010
- [35] Interní materiály ČD, TP-OHL-01/06 List c.1/21- TECHNICKÉ PODMÍNKY – extrakt Kovové kryté rozváděče 25 kV AC typ SAxx
- [36] ČSN EN 62271-1: Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení - Část 1: Společná ustanovení, ČNI, účinnost 08/2009
- [37] <http://www.ivep.cz/>, [on line 11.9.2014]
- [38] <http://www.sez-cz.cz/>, [on line 11.9.2014]
- [39] <http://www.serw.cz/>, [on line 13.9.2014]
- [40] <http://www.gotransit.com/electrification/en/>, [on line 24.9.2014]
- [41] ČSN EN 50122-1, ed. 2: Drážní zařízení - Pevná trakční zařízení - Elektrická bezpečnost, uzemňování a zpětný obvod - Část 1: Ochranná opatření proti úrazu elektrickým proudem, ČNI, účinnost 12/2011
- [42] ČSN EN 50 122-2, ed. 2: Drážní zařízení - Pevná trakční zařízení - Elektrická bezpečnost, uzemnění a zpětný obvod - Část 2: Ochranná opatření proti účinkům bludných proudů DC trakčních soustav, ČNI, účinnost 10/2011
- [43] Výkruta, V.: Vedení zpětného trakčního proudu, str.18-30, č.1/2010
- [44] ČSN EN 50121-1, ed 2: Drážní zařízení - Elektromagnetická kompatibilita - Část 1: Všeobecně, ČNI, účinnost 07/2007
- [45] Zimmert, G., Hofmann, G., Jecksties, R., Kraft, R., Schneider, E.: Rückleiterseile in Oberleitungsanlagen auf der Strecke Magdeburg – Marienborn. EB 94 (1996) / 4
- [46] Hofmann, G., Kontcha, A.: Boostertransformatoren auf AC Bahnen, EB 98 (2000)/7
- [47] Kießling, F., Schneider, F.: Verwendung von Bahnstromrückleitern an der Schnell-Fahrstrecke Madrid – Sevilla, EB 92 (1994) / 4
- [48] Deutschmann, P., Schneider, E.: Zachmeier, M.: Bahnrückstromführung und Erdung bei Bahnanlagen, Teil 2, Wechselstrombahnen, EB 96 (1998) / 4
- [49] Möller, K., Menter, F., Chi, H.: Optimierung des Schutzes von Nachverkehrsbetriebs-einrichtungen hinsichtlich Überspannungen durch Blitzschlag, Výzkumná zpráva FE – č. 70299/89, Ministerstvo dopravy 11.1991
- [50] Schneider, E., Zachmeier, M.: Bahnrückstromführung und Erdung bei Bahnanlagen, Teil 3, Gleichstrombahnen, EB 96 (1998) / 4
- [51] Tuttas, Ch.: Aktiver Bahnrückstromleiter, EB 98 (2000) / 7
- [52] ČSN EN 50 163: Drážní zařízení - Napájecí napětí trakčních soustav, ČNI, účinnost 08/2005
- [53] ČSN EN 50 119, ed 2: Drážní zařízení - Pevná trakční zařízení - Trolejová vedení pro elektrickou trakci, ČNI, účinnost 05/2010
- [54] ČD, státní organizace, divize Dopravní cesty, o.z.; Technické kvalitativní podmínky staveb Českých drah; Kapitola 29; Silnoproudá technologická zařízení, třetí - aktualizované vydání; Schváleno VŘ DDC č.j. TÚDC-15036/2000 ze dne 18.10.2000; účinnost od 1. 12. 2000; Praha; [on line 12.7.2014] Dostupné z: <http://typdok.tudc.cz/>

- [55] ČSN 33 3231: Elektrotechnické předpisy. Trojfázové rozvodny pro napětí do 52 kV, ČNI, účinnost 08/1984 - 08/2014
- [56] <http://www.szdc.cz/modernizace-drahy/zasady-modernizace.html>, [on line 12.7.2014]

Název: Trakční napájecí soustavy
Autoři: doc. Ing. Radovan Doleček, Ph.D.
Ing. Ondřej Černý, Ph.D.
Vydavatel: Univerzita Pardubice
Určeno pro: studenty Doprvní fakulty Jana Pernera Univerzity Pardubice
Do tisku: leden 2015
Vydání: první
Počet stránek: 104
Tisk: Polygrafické středisko Univerzity Pardubice

ISBN 978-80-7395-879-4 (tisk)
ISBN 978-80-7395-880-0 (pdf)
ISBN 978-80-7395-881-7 (CD)