

**DIE KONSEQUENZ DER UNSYMMETRIE DER ANODENREAKTANZEN
DER BEIDEN TRANSFORMATORSEKTIONEN EINES
ZWÖLFPULSIGEN BAHNUNTERWERKSGLEICHRICHTERS DER ČD
VOM GESICHTSPUNKT SEINER EMV-EIGENSCHAFTEN
ANGESICHTS DES SPEISENETZES UND DER FAHRLEITUNG**

Karel HLAVA

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

1. Einleitung

Im Referat [1] wurde die Funktion eines zwölfpulsigen Bahnunterwerksgleichrichters der ČD analysiert, und zwar vom Gesichtspunkt der Abhängigkeit seiner Primärstromoberwellen von der Belastung. Die durchgeführte Simulationsanalyse hat folgende Resultate gezeigt:

- Relativwerte der Primärstromoberwellen mit Ordnungsnummer 11, 13, 23 und 25 sind wesentlich kleiner im Vergleich mit Werten gemäß sog. „Amplitudengesetz“,
- deren Abhängigkeit von der Belastung ist nicht linear,
- die Spektralbestandteile mit Ordnungsnummer 5 oder 7 erscheinen sich im Gesamtprimärstrom des Gleichrichtertransformators nicht, weil die von beiden Transformatorsektionen (Y und D) gelieferte Teilkomponenten sich im Gesamtprimärstrom annullieren.

Diese Resultate wurden auch durch Messergebnisse in Bahnunterwerken der ČD unter Betriebsbedingungen bestätigt.

Die nachstehende Analyse befasst sich mit so einem Zustand, wenn die Kurzschlussspannungen der beiden Gleichrichtertransformatorsektionen Y und D nicht gleich sind.

2. Ausgangskenndaten der Simulationsanalyse und seine Methodik

In Übereinstimmung mit [2] kann man annehmen, dass die äquivalente Anodeninduktivität der Kurzschlussinduktivität beim Drehstromkurzschluss gleich ist. Für die Simulationanalyse wurde für die äquivalente Anodeninduktivität ein Zahlenwert von 250 mH für D und Y Gleichrichtersektionen angenommen. Wegen der Analyse wurde für die Y-Sektion dieser Zahlenwert in drei Stufen, und zwar:

- um 5 %, (bezeichnet wie 105 % Unsymmetrie),
- um 10 %, (bezeichnet wie 110 % Unsymmetrie), und
- um 20 %, (bezeichnet wie 120 % Unsymmetrie) geändert.

In Übereinstimmung mit [1] wurde für die Amplitude der Sekundärphasespannung ein Zahlenwert von 2050 V AC eingeführt.

Der gesamte Primärstrom des Gleichrichtertransformators hat zwei Teilkomponenten, und zwar:

- den Bestandteil, der durch die Y-Sektion gebildet wird, mit Bezeichnung,
- den Bestandteil, der durch die D-Sektion gebildet wird und den man gemäß [1] mit Hilfe folgendes Ausdrückes berechnen kann

$$i(LD) = \frac{i(L4) - i(L5)}{\sqrt{3}}. \quad (1)$$

Die Belastung des Gleichrichters wurde durch eine Reihenkombination von Glättungsdrossel 10 mH und Widerstand ausgehend von 10 Ω (beiläufig 1,15 MW) bis zum 2 Ω (beiläufig 5,5 MW) realisiert.

3. Resultate der Simulationsanalyse

Diese Resultate kann man in drei Teile trennen, und zwar:

- Erkenntnisse anbelangt die gleichgerichtete Ausgangsspannung,
- Erkenntnisse anbelangt das Primärstromspektrum,
- Erkenntnisse anbelangt die Belastungsstromdividierung zwischen Y und D Sektion.

3.1 Resultate der Analyse des Ausgangsspannungsspektrum

Der symmetrisch arbeitende zwölfpulsige Gleichrichter zeigt sich angesichts der gleichgerichteten Ausgangsspannung wie eine Spannungsquelle, die Oberwellen mit Ordnungsnummer 12, 24, usw. liefert.

Im Falle, dass die equivalenten Anodenreaktanzen nicht gleich sind, die Simulationsanalyse dokumentierte die Anwesenheit eines neuen Spannungsbestandteiles, und zwar mit Ordnungsnummer 6 (300 Hz). Die Abhängigkeit des Prozentgehaltes dieses Bestandteiles von der Gleichrichterwirkbelastung für erwähnte Unsymmetrie der equivalenten Anodenreaktanzen ist im **Fig. 1** veranschaulicht. Davon kann man erkennen, dass der Prozentengehalt der 6. Oberwelle:

- ist von der Unsymmetrie der equivalenten Anodenreaktanzen abhängig,
- die Abhängigkeit von der Wirkbelastung des Gleichrichters ist nicht ausgeprägt.

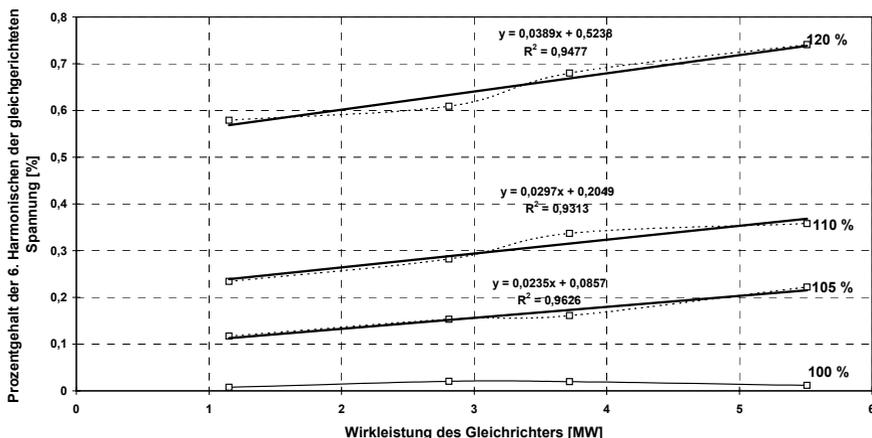


Fig. 1 Abhängigkeit des Prozentgehaltes der 6. Harmonischen der gleichgerichteten Spannung von der Gleichrichterwirkleistung für auserwählte Unsymmetriewerte der Anodenreaktanzen (100, 105, 110 und 120 %)

Im **Fig. 1** kann man nicht nur die oben beschriebene Abhängigkeit, sondern auch ihre Regressionskurven und Angaben über die Verlässlichkeit dieser Regression R^2 finden.

Angaben über den Prozentgehalt des 6. Ausgangsspannungsbestandteiles in Abhängigkeit von der Unsymmetrie der equivalenten Anodenreaktanzen für erwähnte Gleichrichterwirkleistungen kann man in der **Fig. 2** finden. Diese Figur bestätigt, dass:

- eine direkte Abhängigkeit des 6. Ausgangsspannungsbestandteiles von der Unsymmetrie der equivalenten Anodenreaktanzen,
- diese Abhängigkeit von dem Gleichrichterwirkleistung aber relativ nicht markant ist.

Daraus kann man folgende Teilschlussfolgerungen über einen gegebenen Gleichrichtertransformator, wo die equivalente Anodenreaktanzen nicht gleich sind, formulieren:

- das Ausgangsspannungsspektrum wird einen zusätzlichen Spektralbestandteil 300 Hz enthalten,

- der relative Wert dieses neuen Bestandteiles wird keine ausgeprägte Abhängigkeit von der Gleichrichterbelastung auszeichnen.

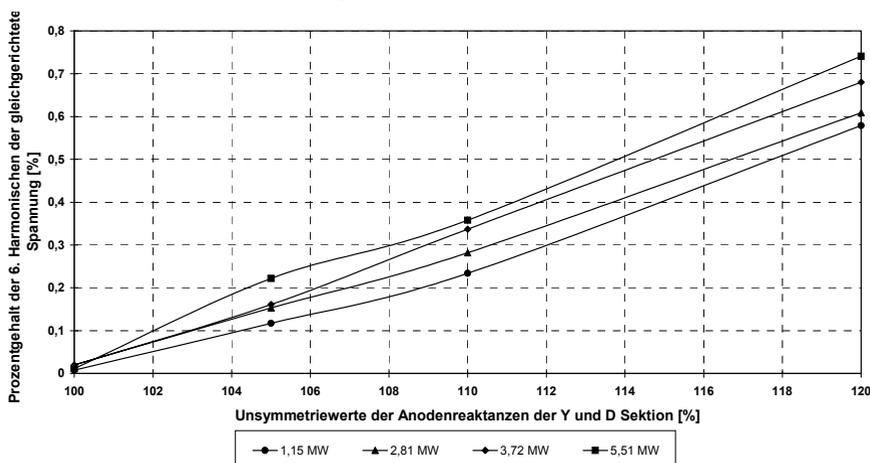


Fig. 2 Abhängigkeit des Prozentgehaltes der 6. Harmonischen der gleichgerichteten Spannung von den Unsymmetriewerten der Y und D Sektion für auserwählte Gleichrichterwirkleistungen (1.15, 2.81, 3.72 und 5.51 MW)

3.2 Resultate der Analyse des Primärstromspektrum

Der Gleichrichter bei symmetrischer Arbeit weist gegenüber dem Speisensetz Eigenschaft wie ein Stromgenerator aus, dessen Spektrum bei dem Ordnungsnummer 11 beginnt. Danach folgen spektrale Bestandteile mit Ordnungsnummern 13, 23, 25, usw.

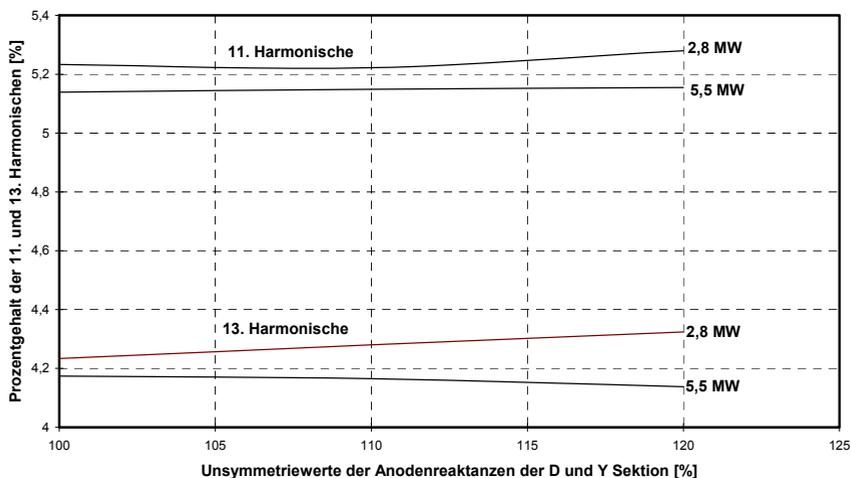


Fig. 3 Abhängigkeit des Prozentgehaltes der 11. und 13. Harmonischen des Primärstromes von der Unsymmetriewerten der Y und D Sektion für zwei auserwählte Gleichrichterwirkleistungen

Im Falle, dass die equivalenten Anodenreaktanzen nicht gleich sind, hat die Simulationsanalyse folgende Resultate gezeigt:

- der Prozentgehalt der obengenannten Bestandteile des Gesamtprimärstromes bleibt praktisch unverändert,
- dieser Strom umfasst diesmal neue Bestandteile mit Ordnungsnummern 5, 7, 17, 19, usw.

Der erste Resultat ist graphisch im **Fig. 3** dargestellt, wo man die Abhängigkeit des Prozentgehaltes der 11 und 13 Bestandteilen von der Unsymmetrie der equivalenten Anodenreaktanzen für zwei Wirkleistungswerte (2,8 MW und 5,5 MW) finden kann.

Die **Fig. 4**, **Fig. 5** und **Fig. 6** bestätigen den zweiten Resultat. In diesen Diagrammen kann man die Abhängigkeit der amperischen Stromwerten der 5, 7, 17 und 19 Bestandteilen von der Gleichrichterwirkleistung für drei Unsymmetriewerte (105 %, 110 % und 120 %) finden. Zu den gemessenen Kurven (gestrichelt) sind hier auch Regressionskurven (kvadratische Parabel) gezeigt.

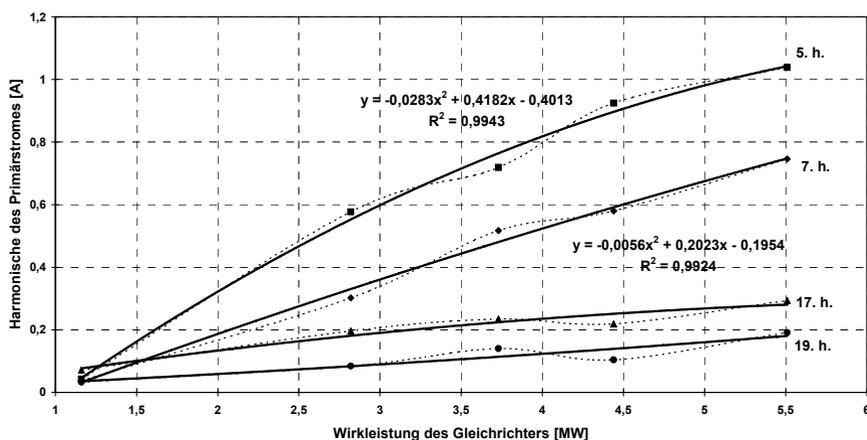


Fig. 4 Abhängigkeit der 5., 7., 17. und 19. Harmonischen des Primärstromes von der Gleichrichterwirkleistung für den Unsymmetriewert der Anodenreaktanzen 5 %

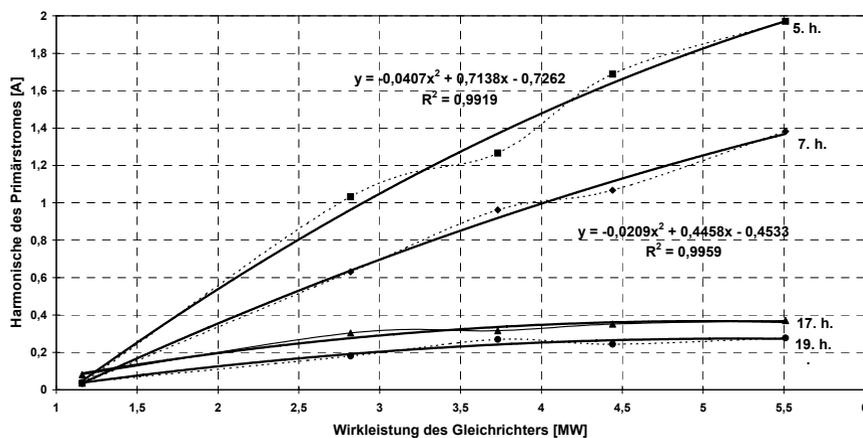


Fig. 5 Abhängigkeit der 5., 7., 17. und 19. Harmonischen des Primärstromes von der Gleichrichterwirkleistung für den Unsymmetriewert der Anodenreaktanzen 10 %

Für die 5. und 7. Bestandteile sind in oben genannten Diagrammen auch die Regressionsformel gegeben. Dazu gehört nun **Fig. 7**, woraus man die Regressionskoeffizienten auch für andere Wirkleistungswerte und Werte der Unsymmetrie ableiten kann, wie folgt:

- für den 5. Bestandteil $I_5(P) = 5A \cdot P^2 + 5B \cdot P + 5C$ [A, MW]
- für den 7. Bestandteil $I_7(P) = 7A \cdot P^2 + 7B \cdot P + 7C$ [A, MW]

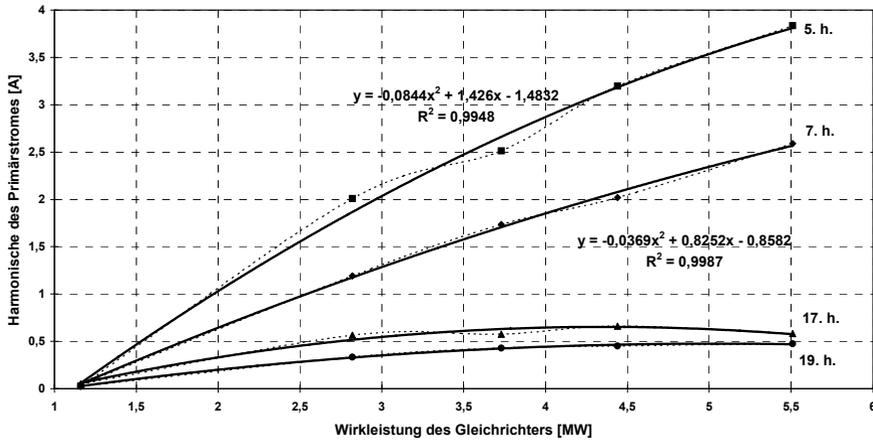


Fig. 6 Abhängigkeit der 5., 7., 17. und 19. Harmonischen des Primärstromes von der Gleichrichterwirkleistung für den Unsymmetriewert der Anodenreaktanzen 20 %

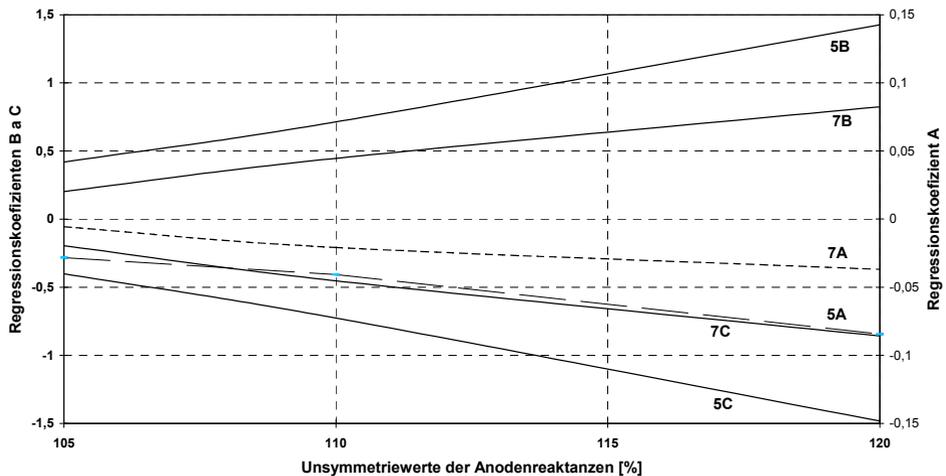


Fig. 7 Regressionskoeffizienten für die Berechnung der Abhängigkeit der 5. und 7. Primärstromharmonischen von der Gleichrichterwirkleistung für Unsymmetriewerte der Anodenreaktanzen im Bereich von 105 % bis 120 %

Aus dem ersten Resultat kann man ableiten, dass der Prozentgehalt der 11. und 23. Harmonischen mit der Wirkleistung sich vermindert, in Übereinstimmung mit [1].

Aus dem zweiten Resultat resultiert folgendes:

Karel Hlava:

- die amperische Werte der 5., 7., 17. und 19. Bestandteilen des gesamten Primärstromes sind von der Wirkleistung nicht linear abhängig,
- und kleiner sind im Vergleich mit der linearisierten Abhängigkeit.

3.3 Resultate der Analyse, wie sich der Gesamtbelastungsstrom untereinander der beiden Y und D Sektionen dividiert

Die Anodenreaktanzenunsymmetrie der Y und D Sektionen beeinflusst die Dividierung des Gesamtbelastungsstromes in diese Sektionen. Es ist klar, dass die Sektion, die grössere Anodenreaktanzenwerte hat, muss (einen) kleineren Anteil des Gesamtstromes liefern.

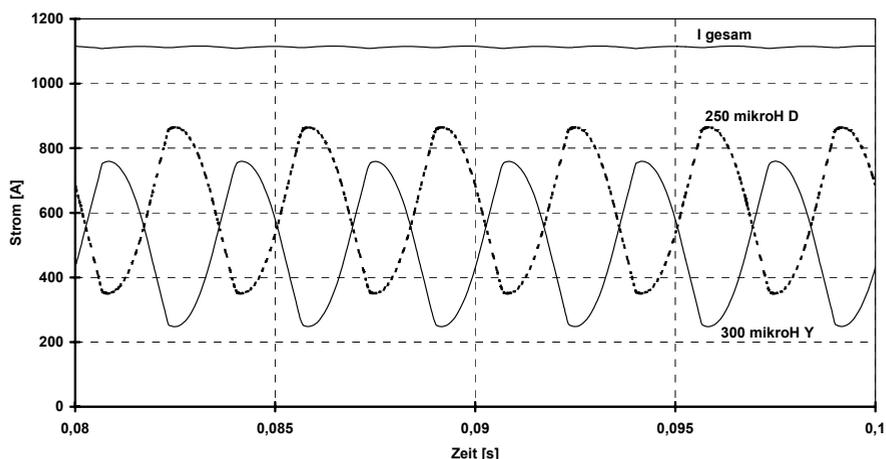


Fig. 8 Zeitverläufe der Ströme der Y und D Sektionen und des Gesamtstromes

Der Zeitverlauf der Ströme, die beide Sektionen liefern, kann man im **Fig. 8** finden. Für diese Simulation hat man den Unsymmetriewert von 20 % (Grundwert für die D-Sektion ist 250 μH und der vergrösserte Wert für die Y-Sektion ist 300 μH), den Gesamtstrom 1110,9 A und die Wirkleistung des Gleichrichters 3,7 MW erwähnt.

Auch **Fig. 9** wurde mittels der Simulation abgeleitet. Hier kann man für gewählte Unsymmetriewerte die Abhängigkeit der Prozentwerten der beiden Stromanteile, die die Y- und D-Sektion liefert, finden. Aus dieser Fig 9 folgt, dass die Prozentwerte der Stromanteilen von der Wirkleistung des Gleichrichters unabhängig sind. Sind aber von dem Unsymmetriewert der Anodenreaktanzen begrifflich abhängig.

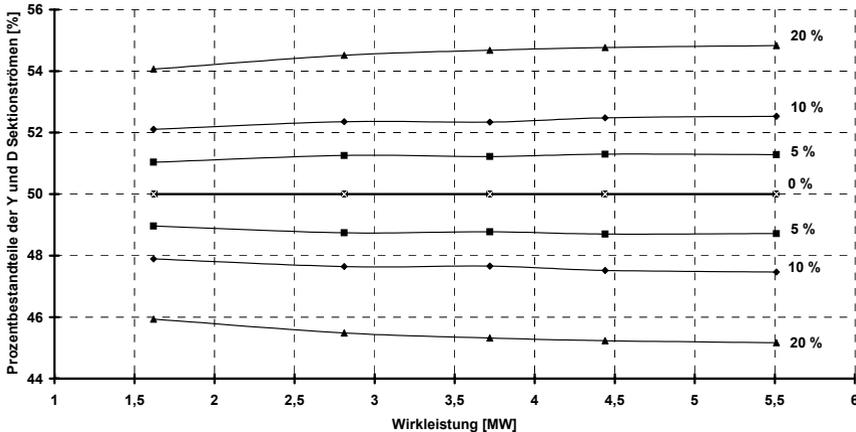


Fig. 9 Abhängigkeit der Verteilung der Y und D Sektionströmen von der Wirkleistung für gewählte Unsymmetriewerte der Anodenreaktanzen

4. Zahlenbeispiel

Man hat einen Gleichrichtertransformator mit Wirkleistung 5 MW, wo die äquivalente Anodenreaktanzen sind 115 % unsymmetrisch.

In diesem Fall gibt die **Fig. 2** für den 6. Ausgangsspannungbestandteil bei Nennwirkleistung die Prozentwerte dieses Bestandteiles im Grenzen von 0,4 % bis 0,55 %, das ist für 3300 V DC Nennspannung 13,2 V AC bis 18,2 V AC.

In dem Gesamtprimärstrom kann man bei Nennleistung folgende Bestandteile finden:

- **Fig. 7** gibt für den 5. Bestandteil die Regressionparabel

$$I_5(5) \cong -0,07 \cdot 5^2 + 1,1 \cdot 5 - 1,15 = 2,6 A$$

- **Fig. 7** gibt für den 7. Bestandteil die Regressionparabel

$$I_7(5) \cong -0,03 \cdot 5^2 + 0,65 \cdot 5 - 0,65 = 1,85 A$$

5. Schlussfolgerungen

Die beschriebene Simulationsanalyse zusammen mit den Resultaten in [1] hat nachstehende Folgerungen gezeigt:

1. Das zwölfpulsige Gleichrichterschema kann im Ausgangsspannungsspektrum außer der bekannten Bestandteilen 12. (600 Hz), 24. (1200 Hz) usw. auch den neuen Bestandteil 6. (300 Hz) nur dann enthalten, wenn die äquivalenten Anodenreaktanzen der Y und D Sektion sich unterscheiden.

Karel Hlava:

2. Der Prozentgehalt dieses neuen Bestandteiles ist vor allem von der Unsymmetrie der equivalenten Anodenreaktanzen abhängig, seine Abhängigkeit von der Wirkleistung ist dagegen fast ausdruckslos.
3. In dem Primärstromspektrum kann man im Falle der Unsymmetrie der equivalenten Anodenreaktanzen, außer der bekannten Bestandteilen 11. (550 Hz), 13. (650 Hz), 23. (1150 Hz), 25. (1250 Hz) usw. auch neue Bestandteile 5. (550 Hz), 7. (350 Hz), 17. (850 Hz), 19. (950 Hz) usw. finden.
4. Die amperischen Werte der Bestandteilen 5., 7., 17., 19. usw. sind von der Wirkleistung des Gleichrichters unlinear abhängig (sind kleiner) ähnlich wie [1] für die 11., 13., 23. und 25. Bestandteile abgeleitet hat.
5. Die **Fig. 7** gibt eine Möglichkeit die Abhängigkeit der amperischen Werten der 5. und 7. Primärstrombestandteilen von der Gleichrichterwirkleistung für beliebige Unsymmetriewerte mittels Regressionsparabel abzuschätzen.
6. Die **Fig. 9** illustriert die Beeinflussung der Einteilung des Gesamtstromes in die Y und D-Sektion durch den Unsymmetriewert der Anodenreaktanzen. Ferner hat die Simulation gezeigt, dass die Wirkleistung einen vernachlässigbaren Einfluss hat.

Lektoroval: Prof.Ing. Karel Horák, Dr.Sc.

Předloženo: 23.2.2004

Literatur

1. HLAVA K. *Elektromagnetische Verträglichkeit des zwölfpulsigen Bahnunterwerksgleichrichters der ČD. Scientific Papers of the University of Pardubice, Series B, Nr.8(2002), S.95-106.*
2. HELLER B. *Stanovení rozptylu transformátorů usměrňovačů s ohledem na komutaci anod. Elektrotechnický obzor, sv. 43, č.3(1954), str. 119-123.*
3. HLAVA K. *Parametry odběru elektrické energie dvanáctipulzním trakčním usměrňovačem v závislosti na jeho zatížení. Vědeckotechnický sborník Českých drah, č. 14(2002), str. 121-139.*

Resumé

DŮSLEDKY NESYMETRIE ANODOVÝCH REAKTANCÍ OBOU SEKČÍ TRANSFORMÁTORU DVANÁCTIPULZNÍHO TRAKČNÍHO USMĚRŇOVAČE ČD Z HLEDISKA JEHO EMC VŮČI NAPÁJECÍ SÍTI A TRAKČNÍMU VEDENÍ

Karel HLAVA

Studie analyzuje simulační metodou stav, kdy anodové reaktance obou sekčí dvanáctipulzního trakčního usměrňovače ČD nemají stejné hodnoty. Poznatky se týkají tří oblastí, a to:

- spektra výstupního napětí,
- spektra primárního proudu,
- rozdělení zatěžovacího proudu do obou sekčí usměrňovače.

Summary

CONSEQUENCE OF TWELVE-PULSE ČD TRACTION SUBSTATION RECTIFIER ANODE REACTANCES UNSYMMETRY FROM STANDPOINT OF HIS EMC CHARACTERISTICS TO FEEDING NET AND CATENARY

Karel HLAVA

The article describes the results of simulation analysis for the case of anode reactance unsymmetry of the ČD twelve-pulse substation traction rectifier. The results give understandings about:

- output voltage spectrum,
- primary current spectrum,
- current division between the Y and D section.

Zusammenfassung

DIE KONSEQUENZ DER UNSYMMETRIE DER ANODENREAKTANZEN DER BEIDEN TRANSFORMATORSEKTIONEN EINES ZWÖLFPULSIGEN BAHNUNTERWERKSGLEICHRICHTERS DER ČD VOM GESICHTSPUNKT SIENER EMV-EIGENSCHAFTEN ANGESICHTS DES SPEISENETZES UND DER FAHRLEITUNG

Karel HLAVA

Die Studie analysiert durch Simulationsanalyse eine solche Situation, wenn die äquivalenten Anodenreaktanzen der beiden Y und D Sektion des zwölfpulsigen Bahnunterwerksgleichrichters der ČD nicht gleich sind. Die Erkenntnisse kann man in drei Teile trennen, und zwar:

- für das Ausgangsspannungsspektrum,
- für das Primärstromspektrum,
- für die Belastungsstromdividierung zwischen Y und D Sektion.