

**ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT
DER TRAKTIONSYSTEMEN 3 KV DC UND 25 KV, 50 HZ DER ČD, PROBLEME UND
LÖSUNGEN**

Karel HLAVA

Technische Universität Pardubice

Dieses Referat ist in fünf Hauptteile gegliedert:

1. Historische Gründe für Anwendung des Traktionssystems 3 kV DC bei der ČSD und ČD
2. Historische Gründe für Anwendung des Traktionssystems 25 kV, 50 Hz bei der ČSD und ČD
3. Forderungen für EMV des Traktionssystem 25 kV, 50 Hz angesichts des speisenden 110 kV Netzes,
4. Gründe warum diese Forderungen ohne Zusatzmaßnahmen nicht erfüllbar sind,
5. Realisierte Maßnahmen der ČD zur Erfüllung der obengenannten Forderungen, erzielte Ergebnisse und Betriebserfahrungen.

1. Historische Gründe für Anwendung des Traktionssystems 3 kV DC bei der ČSD und ČD

Tschechische Bahnen haben lange Tradition mit Gleichstromsystem 1,5 kV und 3 kV. Das 1,5 kV System wurde schon im Jahre 1903 für die Strecke Tábor – Bechyně in Betrieb gesetzt und in zwanzichsten Jahren im Eisenbahnknotenpunkt Prag im Betrieb gestellt. Das Bahnunterwerk wurde damals mit einem rotierenden Umformer und einem zwölfanodigen Quecksilbergleichrichter ausgerüstet. Wegen der Wasserkühlung dieses Gleichrichters mußte man die Minus-Polarität in die Fahrleitung zuführen.

Nach dem zweiten Weltkrieg wurde entschieden eine neue Elektrifikation mit Gleichstromsystem 3 kV auszurüsten. Das betraf die „nördliche“ Hauptstrecke Prag –Ostrava – Žilina – Košice – Čop mit Bergteil Liptovský Mikuláš – Štrba – Poprad (17%).

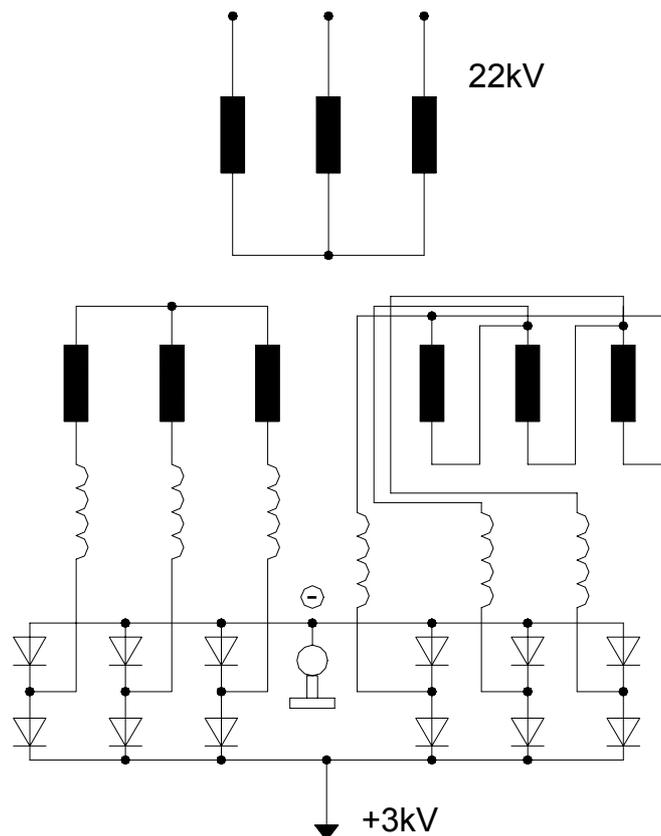


Fig. 1 12-pulsige Schema des Bahnunterwerkgleichrichters

Die Bahnunterwerke erhielten vom Anfang dieser Elektrifikation schon zwölfpulziges Gleichrichterschaltenschema, das mit einanodischen „Gefäßen“ gebaut wurde. Begrenzung des Oberwellengehaltes im Ausgangsspannung (erste Harmonische $n = 12$, dann 24, usw., keine Filterung notwendig) war derzeit wie Hauptvorteil dieses Schaltenschema betont. Heute sind sämtliche Gleichrichter auf Halbleiterdioden umgebaut, aber das Schema bleibt erhalten. Auch neugebaute Bahnunterwerke sind mit diesem Schaltenschema ausgerüstet.

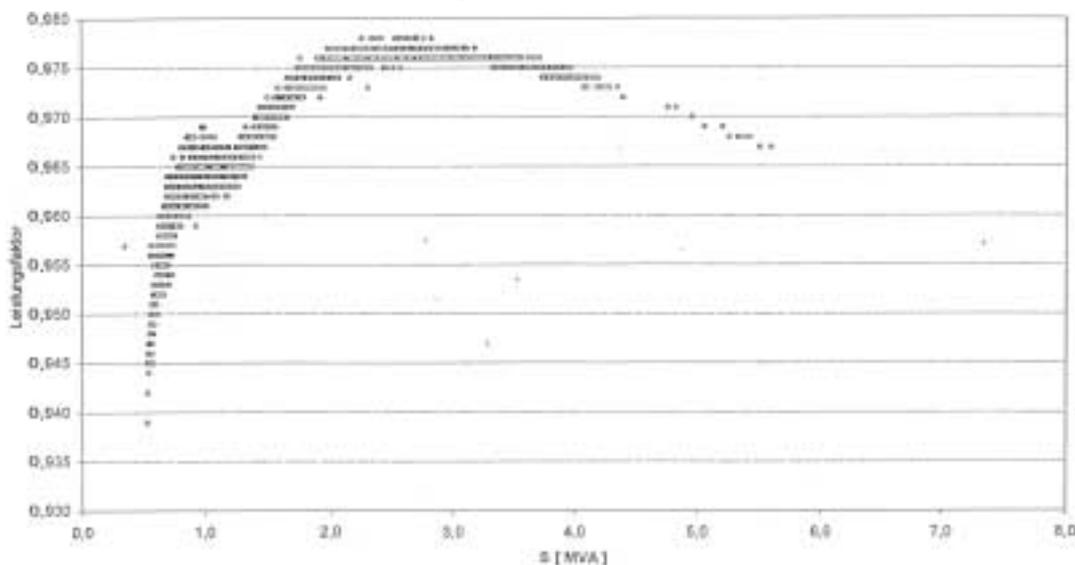


Fig. 2 Leistungsfaktor des Bahnunterwerkgleichrichters

Vom Gesichtspunkt der EMV sind wir heute für dieses Schema sehr dankbar. Auf dem Drehstromeingang (22 kV) erscheinen sich nur ungeradzahlige Harmonische beginnend mit $n = 11$, dann 13, usw., aber keine $n = 5$ oder 7. Deswegen ist bis heute nicht notwendig etwas für die Verbesserung der EMV-Eigenschaften der Bahnunterwerke 3 kV zu bauen.

2. Historische Gründe für Anwendung des Traktionssystems 25 kV, 50 Hz bei der ČSD und ČD

Einphasenwechselstromsystem 25 kV, 50 Hz wurde in sechzigsten Jahren an ČSD eingeführt auch dafür, um eine Möglichkeit dem Lokomotivehersteller für Betriebserfahrungen mit diesem System zu leisten. Die „südliche“ Hauptstrecke Pilsen – Budweis, Kutná Hora – Brno – Bratislava – Štùrovo wurde mit diesem System elektrifiziert.

Bahnunterwerke haben zwei einphasige Haupttransformatoren 110/27 kV, die zu je zwei getrennten Phasenleitern des 110 kV-Netzes angeschlossen sind.

Sehr wichtig ist die Notwendigkeit alle Fahrdrabschnitte nur einseitig speisen. Zweiseitige Speisung der Fahrleitung ist seitens Hochspannungsnetz 110 kV nicht erlaubt. Dazu sind zwei Gründe:

- es wäre möglich, daß längs der Fahrleitung zwischen den benachbarten Bahnunterwerken einphasiger Ausgleichleistung fließen kann,
- Leitungen 110 kV sind vom Schaltpunkt z. B. 400/110 kV oder 220/110 kV nur einseitig gespeist und es wäre möglich eine Rückspannung über Fahrleitung in ausgeschalteten 110 kV-Leitung zuzuführen.

Um diese Situation auszuschließen ist es in ČD Bahnunterwerken notwendig ein Rückwirkleistungsrelais einzubauen. Dieses Relais andererseits schließt Rekuperationbremsung aus.

Sämtliche Einsystemstreckenlokomotiven sind mit Gleichstromfahrmotoren (Wellenstromfahrmotoren) ausgerüstet, und notwendige regelbare Gleichspannung liefert Diodengleichrichter in zweipulziger Brückenschaltung. Kontaktlose Phasenregulation benutzt man nicht.

Zweissystemlokomotiven (25 kV, 50 Hz und 3 kV DC) haben am Eingang auch einen zweipulzigen Brückengleichrichter mit unregelbarer Ausgangsspannung. Diese Spannung kommt entweder auf Anfahrwiderstände oder auf Gleichstromsteller und dann zu Gleichstromfahrmotoren (Wellenstromfahrmotoren).

3. Forderungen für EMV des Traktionssystems 25 kV, 50 Hz angesichts des speisenden 110 kV Netzes,

Sämtliche Bahnunterwerke der ČD sind an Freileitungen der einzelnen Energielieferanten (REAS) angeschlossen. Bahnunterwerke des Gleichstromsystems 3 kV sind entweder direkt aus REAS - Leitung 22 kV, oder aus eisenbahneigenen Transformator 110/22 kV gespeist. Bahnunterwerke des Einphasenwechselstromsystems sind direkt an REAS - Doppelfreileitung 110 kV angeschlossen.

Die Energielieferanten fordern für Abnehmer gelieferter elektrischer Energie strenge technische Bedingungen, die in folgenden Unterlagen vorgeschrieben sind:

- Staatsgesetz Nr. 222/1994 (2. 11. 1994), sogenanntes „energetisches Gesetz“,
- Gruppe der Normen des energetischen Unternehmens (PNE) der Reihe PNE 33 3430,
- Lokalbedingungen incl. Lieferbedingungen der einzelnen Energielieferanten.

Diese Unterlagen definieren folgende Kriterien der EMV der Verbrauchereinrichtungen hinsichtlich des Speisensetztes:

- Leistungsfaktor der Grundschiwingung $\cos \varphi_1$, der durch Ausdruck $\operatorname{tg} \varphi_1 = Q/P$ definiert ist, und sein Charakter (induktiv),
- Unverlangene Lieferung der kapazitiven Energie,
- Verzerrung des Zeitverlaufes der Netzspannung im Anschlusspunkt des Verbrauchers durch Spannungsharmonischen (vorwiegend für Hochspannungsnetze),
- Durchdringen der Stromharmonischen, die von nichtlinearen Verbrauchereinrichtungen wie Stromquellen erzeugt sind, in das speisende Netz (vorwiegend für Niederspannungsnetze),
- Dämpfung des Rundsteuersignals durch Eingangsimpedanz des Verbrauchereinrichtung für Arbeitsfrequenz dieses Signals,
- Spannungsunsymmetrie des speisenden Drehstromsystems durch einphasige Belastung dieses Systems,
- häufige und rasche Änderungen der Leistungsabnahme, die einen „flicker-Effekt“ verursachen.

Grundsätzliche Forderungen kann man im „**energetischen Gesetz**“ finden. Dort im §15, Punkt (4) geschrieben steht:

„Der Abnehmer ist verpflichtet

zu versichern, dass seine Verbrauchereinrichtung... durch erreichbare technische Mittel zur Verminderung der Rückwirkungen auf die Elektrizitätsqualität und zur Beseitigung der Beeinflussung der Regel-, Mess-, und Rundsteuerungseinrichtungen des Energielieferanten ausgerüstet wird,

b) elektrische Energie mit induktiven Leistungsfaktor 0,95 bis 1,0 abzunehmen....“

Die Normen des energetischen Unternehmens (PNE) der Reihe PNE 33 3430 sind bis heute in 7 Teile gegliedert, und zwar:

- **PNE 33 3430-0 (1998)** „Rechnerische Bewertung der Rückwirkungen seitens der Energieverbraucher“,
- **PNE 33 3430-1 (1998)** „Qualitätsparametern der elektrischen Energie, Teil 1: Harmonischen“
- **PNE 33 3430-2 (1995)** „Qualitätsparametern der elektrischen Energie, Teil 2: Schwankungen der Spannung“
- **PNE 33 3430-3 (1997)** „Qualitätsparametern der elektrischen Energie, Teil 3: Unsymmetrie der Spannungen“
- **PNE 33 3430-4 (1997)** „Qualitätsparametern der elektrischen Energie, Teil 4: Sinken und kurze Unterbrechungen der Spannung“
- **PNE 33 3430-5 (1998)** „Qualitätsparametern der elektrischen Energie, Teil 5: Transiente Spannungen - Impulsstörungen“
- **PNE 33 3430-6 (1998)** „Qualitätsparametern der elektrischen Energie, Teil 6: Begrenzung der Rückwirkung auf das Rundsteuerungssystem“
- **PNE 33 3430-7 (1999)** „Charakteristiken der Spannungen der elektrischen Energie, die aus öffentlichem Distributionsnetz geliefert sind“

Einige von diesen PNE sind überwiegend schon mit Hilfe der EN oder IEC Normen zusammengesetzt, sind aber bis heute nicht wie ČSN angenommen.

In der Norm **PNE 33 3430-0** kann man allgemeine Berechnungsformeln finden, die einzelne Situationen und konkrete Konfigurationen des Netzes und der Verbrauchereinrichtung vom Gesichtspunkt der angeführten Kriterien der EMV theoretisch bewerten. Diese Norm wurde auch mit Hilfe der VDEW Unterlage „Grundsätze für die Beurteilung von Netzurückwirkungen“ (1992) zusammengesetzt.

Die Norm **PNE 33 3430-1** befasst sich mit Anschlussbedingungen einzelner Verbraucher zu Verteilungsnetzen vom Gesichtspunkt der Harmonischen. Hier kann man nicht nur

- zulässige Grenzwerte der Stromharmonischen für Niederspannungsnetze,
- zulässige Grenzwerte der Spannungsharmonischen für Hochspannungs- und Höchstspannungsnetze finden, sondern auch Mess- und Bewertungsmethoden und Richtlinien für Genehmigungsvorgang für neue Energieabnahmeeinrichtungen.

Aus dem Gesichtspunkt der Bahnunterwerke ist wichtig, dass man das zulässige Kompatibilitätsniveau der Spannungsharmonischen im Anschlusspunkt des Bahnunterwerkes zum 110 kV-Netz nicht im Ganzen ausnützen kann.

Es ist vorgeschrieben, daß man für das Bahnunterwerk nur den Teil dieser Niveau ausnützen darf, der vom Leistunganteil des Bahnunterwerkes zur möglicher Leistung des 110 kV-Netzes im Anschlusspunkt abhängig ist.

Restliche Werte der Spannungsharmonischen gestalten Reserve für übrige und auch zukünftige Energieverbraucher im denselben Anschlusspunkt. Konkrete so bestimmte zulässige herabsetzte Grenzwerte der einzelnen Spannungsharmonischen sind für jedes Bahnunterwerk vom betreffenden Energielieferant vorgeschrieben.

Es handelt sich manchmal um sehr kleine Grenzwerte (z. B. 0,2% der Grundfrequenz für 3. Spannungsharmonische). Dann ist es fraglich, was für eine Spannungübersetzung ein Spannungsmesstransformator 110/0,1 kV für Harmonische gewährleistet. Auf Grund unserer Messung schon im 6 kV, 22 kV und 27 kV Nennspannungssystem ist uns bekannt, dass ein Spannungübersetzungsfehler für

Harmonischen nicht nur vom Typ und Lieferanten des Messtransformators, sondern auch vom Charakter der Messtransformatorbelastung abhängig ist. Wir haben auch bis heute keine Katalogangaben von Messtransformatorlieferanten für Übersetzungsfehler der Spannungsmesstransformatoren auf Harmonischen gefunden. Für Strommesstransformatoren ist, Literaturangaben nach, die Situation günstiger.

Die Norm **PNE 33 3430-2** befasst sich mit Spannungswankungen im Sinne des „flicker-Effektes“. Unter dem „flicker-Effekt“ versteht man Schwankungen der Lichtflußintensität einer Glühlampe 60 W mit Doppelspirale. Diese Norm gibt prozentige Grenzwerte für Spannungsschwankungen, die im Umfang von 0,1 bis 2000 pro Minute entstehen. Diese Grenzwerte sind am meisten für Netze, die z. B. elektrische Lichtbogenöfen speisen, wichtig. Leider auch die elektrische Zugförderung kann genannte Spannungswankungen verursachen, trotzdem aber bis heute konnte man so etwas im Bahnunterwerk nicht beobachten.

Die Norm **PNE 33 3430-3** ist für Spannungsunsymmetrie des Drehstromnetzes gültig. Die Problematik der Spannungsunsymmetrie im 110 kV-Netz ist für Wechselstromtraktion 25 kV, 50 Hz sehr wichtig. In dieser Norm kann man vor allem Messmethodik und Auswertungsmethodik finden. Es ist hier eine interessante Messmethode beschrieben, die Messung von drei verketteten Spannungen erfordert. Mit diesen Angaben kann man den Spannungsunsymmetriegrad rechnerisch auswerten. Da die Auswertungsformel vierte Potenzen der gemessenen Spannungen benützt, sollte man diese Eingangsangaben sehr sorgfähig (unbedingt gleichzeitig und digitalisch) messen.

Viele Messungen im 110 kV-Netz haben uns gezeigt, dass die Bahnunterwerke keine einzige Spannungsunsymmetrie-Ursache bilden. Zum Beispiel unperfekte Transposition der 110 kV-Freileitung oder andere unsymmetrische Netzbelastungen können Netzspannungsunsymmetrie ohne Belastung durch das Bahnunterwerk verursachen.

Zulässige Grenzwerte des Spannungsunsymmetriegrades sind vom Energielieferant für jedes Bahnunterwerk im Anhängigkeit von Netzlokalbedingungen vorgeschrieben. Die ČD haben in diesem Fall nur eine Möglichkeit diese Bedingungen wenigstens teilweise zu erfüllen, und zwar durch sogenannten „V“ Einspeisung des Bahnunterwerkes. Bei dieser Lösung muss man die beide Unterwerkstransformatoren unter Spannung setzen und an verschiedene Phasenleiter des Drehstromnetzes zuschalten. Gleichzeitig müssen die Traktionsbelastungen der beiden Unterwerkstransformatoren sich gleichstellen.

Die Normen **PNE 33 3430-4** und **PNE 33 3430-5** betreffen die ČD nicht.

Die Norm **PNE 33 3430-6** ist für ČD sehr wichtig im Zusammenhang mit den Filtration-Kompensation Einrichtungen (FKZ), die ferner beschrieben werden. In dieser Norm kann man rechnerische Unterlagen für Bewertung der Rückwirkung einzelner Verbrauchertypen finden. Auf Grund dieser Bedingungen der Energielieferant gibt minimale Impedanzwerte des gemeinsamen Bahnunterwerkseinrichtung für Rundsteuerungsarbeitsfrequenz. Diese Tonfrequenzen sind in Norm **PNE 38 2530** erhalten. In Tschechischen Republik benutzt man bis heute unifizierte Arbeitsfrequenz 216 2/3 Hz (ausnahmsweise auch noch 1060 Hz).

Die Norm **PNE 33 3430-7** ist mit Hilfe der EN 50 160 zusammengesetzt. Hier kann man nähere Angaben für die geforderte Qualität der gelieferten Elektroenergie und für Rückwirkung der Verbraucher auf die Netzspannungsqualität auch mit statistischer Bewertung finden (zum Beispiel 95% Wahrscheinlichkeit der Grenzwerteüberschreitung).

4. Gründe warum diese Forderungen ohne Zusatzmaßnahmen nicht erfüllbar sind

Die Grundschwierigkeit im Sinn der EMV bei Einphasenwechselstromsystems 25 kV, 50 Hz bei der ČD geht von der Triebfahrzeugkonzeption hervor. Diese Triebfahrzeugen haben:

- ungünstige Leistungsfaktorwerte, wo maximale Werte bis nur 0,85 induktiv erreichbar sind,
- wesentliche Verzerrung des Abnehmerstromzeitverlaufes durch ungerade Harmonische, deren Prozentwerte dem Amplitudengesetz $I_n \cong 100/n$ [%] entsprechen:

n	3	5	7	9	11	13
I_n/I_1 [%]	33	20	14	11	9	7

Die Gleichstromfahrmotoren (Wellenstromfahrmotoren) werden durch einphasiger Brückengleichrichter über Glättungsdrossel gespeist. Diese Schaltung bildet ein kurzzeitiger vorübergehender Kurzschluss der Sekundärwicklungen des Fahrzeugtransformators, und zwar zweimal pro Periode wegen der gleichzeitigen Stromführung aller vier Diodenzweigen des Fahrzeuggleichrichters (Stromüberlappung). Im Laufe dieser zwei Zeitabschnitten entsteht auch ein Kurzschluss der Fahrleitungsspannung, der aber durch die Innenimpedanz des Fahrzeugtransformators begrenzt ist, bildet aber zwei Teile des Fahrzeugstromzeitverlaufes. In übrigen zwei Zeitabschnitten werden Fahrmotoren über Glättungsdrosseln gespeist.

Der so beschriebener Prozeß bildet im Triebfahrzeugstrom obengenannten Stromharmonischen und der Fahrzeuggleichrichter wirkt für Oberwellen wie eine Stromquelle, die theoretisch gesagt unbegrenzte Innenimpedanz ausweist.

Der ganze Fahrstromkreis (Fahrdraht und Tragseil, Rückstromleitung mit Schienen und Erde, Bahnunterwerktransformator und 110 kV-Freileitung bis zum Speisepunkt mit theoretisch unbegrenzter Leistung und deshalb vernachlässigbarer Innenimpedanz auch für Oberwellen) ist wegen kleiner Dämpfung (kleiner Längswiderstand und hoher Isolationswiderstand) schwingungsfähig.

Deshalb dieser Stromkreis gibt seine Antwort an die periodisch entstehende begrenzte Kurzschlüsse der Fahrleitungsspannung in Form eigener Schwingungen, die auch zweimal pro Periode im Augenblick der Beendigung der Überlappungsperiode sich ausweisen. Diese Schwingungen kann man im Bahnunterwerkstrom, aber nicht im Fahrzeugabnehmerstrom beobachten. Wegen der Dämpfung, die durch Leistungsabnahme des fahrenden Triebfahrzeuges gegeben ist, ist dieser transiente Schwingungsbestandteil üblich stark gedämpft.

Seine Frequenz ist durch elektrischen Fahrstromkreisparametern definiert. Anders gesagt, diese Eigenfrequenz kann auch andere Werte als Vielfache der Netzfrequenz ausweisen.

Die Eigenfrequenz des ganzen Fahrstromkreises kann grundsätzlich Werte von zwei Gruppen haben. Im Falle, daß diese Frequenz genügend weit von einem Vielfache der Netzfrequenz liegt, sind im Bahnunterwerk die Stromoberwellen des Triebfahrzeuggleichrichters maßgebend.

Im Falle aber, wenn diese Eigenfrequenz des ganzen Fahrstromkreises zufällig in Nähe von einem ungeraden Vielfache der Netzfrequenz liegt, dann entsteht im Fahrstromkreis eine stehende elektrische Welle, die nicht nur durch Eigenschwingungen des Fahrstromkreises, sondern auch durch Oberwellen des Fahrzeugdiodengleichrichter, erregt ist.

Die Fahrleitung wird bei der ČD immer einseitig gespeist. Man kann zwei Schaltungen des Bahnunterwerkes benützen, und zwar „L“ und „T“.

Im Falle des „L“ Schaltung wird die Fahrleitung nur in einer Richtung gespeist. Dann am Fahrleitungsende entstehen Spannungsbauch und Stromknotenpunkt. Im Bahnunterwerk und theoretisch im Speisepunkt des 110 kV-Netzes entstehen Spannungsknotenpunkt und Strombauch. Deswegen ist es zufällig möglich, daß im Stromspektrum des Bahnunterwerkes einige Frequenzkomponenten durch Resonanz des ganzen Fahrstromkreises verstärkt werden.

Die Eigenfrequenzen des ganzen Stromkreises kann man in diesem Fall mittels folgender transcendental Gleichung errechnen:

$$Z_{0,TV} \cot g(\alpha_{TV,1} \ell_{TV} n_R) = X_{TT,1} n_R + \frac{Z_{0,E}}{P_{TT}} \operatorname{tg}(\alpha_{E,1} \ell_E n_R),$$

wo:

$Z_{0,TV}$ Wellenwiderstand der Fahrleitung [Ω],

$$Z_{0,TV} = \sqrt{\frac{L_{TV}}{C_{TV}}},$$

L_{TV} Fahrleitungsinduktivität pro km [H/km]

C_{TV} Fahrleitungskapazität pro km [F/km]

$\alpha_{TV,1}$ Fortpflanzungskonstante der Fahrleitung, für 50 Hz [rad/km],

$$\alpha_{TV,1} = 100\pi\sqrt{L_{TV}C_{TV}},$$

- ℓ_{TV} Länge der Fahrleitung [km],
 $X_{TT,1}$ Reaktanz des Bahnunterwerktransformators,
 $Z_{0,E}$ Wellenwiderstand der 110 kV Freileitung [Ω],

$$Z_{0,E} = \sqrt{\frac{L_E}{C_E}},$$
 L_E Freileitungsinduktivität pro km [H/km]
 C_E Freileitungskapazität pro km [F/km]
 p_{TT} Übersetzungsverhältnis des Bahnunterwerktransformators,
 $\alpha_{E,1}$ Fortpflanzungskonstante der 110 kV Freileitung, für 50 Hz [rad/km],

$$\alpha_{E,1} = 100\pi\sqrt{L_E C_E}$$
 ℓ_E Länge der 110 kV Freileitung [km],
 n_R $n_R = f_R / 50$ ist.

Im Falle der „T“ Schaltung speist man die Fahrleitung in beiden Richtungen. Das Bahnunterwerk liegt dann oft annähernd in der Mitte der gespeisten Fahrleitungsabschnitten. Hier entstehen wieder Spannungsbäuche und Stromknotenpunkte an beiden Fahrleitungsenden. Im Bahnunterwerk entsteht Strombauch und Spannungsknotenpunkt. Die Stromkomponente der Resonanzfrequenz im Strombauch fließen längs der Fahrleitung, aber nicht in den Bahnunterwerkstransformator, weil hier ein Spannungsknotenpunkt entsteht. Deswegen ist vom Gesichtspunkt der EMV das „T“ Schaltung günstiger.

Die Eigenfrequenzen des ganzen Stromkreises kann man in diesem Fall mittels folgender transcendental Gleichung errechnen:

$$\frac{Z_{0,TV}}{\operatorname{tg}(\alpha_{TV,1}\ell_{TV,a}n_R) + \operatorname{tg}(\alpha_{TV,1}\ell_{TV,b}n_R)} = X_{TT,1}n_R + \frac{Z_{0,E}}{p_{TT}^2} \operatorname{tg}(\alpha_{E,1}\ell_E n_R),$$

wo die Länge der beiden Fahrleitungsabschnitten mit Indexen „a“ und „b“ gegeben ist.

Die Stromharmonische, die in das Bahnunterwerk kommen, dringen durch den Bahnunterwerkstransformator 110/27 kV in das 110 kV-Netz mit Verminderung nur wegen seiner Übersetzung. Messungen haben eine Möglichkeit gegeben diesen Transformator nur durch längsgeschalteter Induktivität zu ersetzen. Diese Induktivität kann man durch Ersatzreaktanz $X_{TT,1}$ [Ω] für 50 Hz mittels folgender Formel errechnen:

$$X_{TT,1} = \frac{e_K U_{TV}^2}{100 S_{TT}},$$

wo:

- e_K Kurzschlußspannung des Bahnunterwerktransformators [%]
 U_{TV} Fahrleitungsspannung [V]
 S_{TT} Nennleistung des Bahnunterwerktransformators [VA].

Innere Kapazitäten (zwischen Wicklungen und zwischen Wicklungen und magnetischem Kreis) kann man für energetische Oberwellen vernachlässigen.

In diesem Hinsicht unterscheidet sich der Leistungstransformator von Spannungsmesstransformatoren, die für Oberwellenmessungen beginnend von ungefähr 400 Hz schon Messfehler aufweisen.

Gemäß Ohmscher Gesetzes bilden diese Stromharmonische auf der Netzinneimpedanz Spannungsharmonische, die den Zeitverlauf der Netzspannung im Anschlusspunkt des Bahnunterwerkes verzerren. Der Energielieferant ist verpflichtet Qualität der Netzspannung im Interesse der anderen Elektriebenutzer im Sinn der EN 50 160 so gut wie möglich zu halten. Deswegen gibt es Prozentgrenzwerte für jede Spannungsharmonische und jedes Bahnunterwerk. Es ist wichtig, daß die Werte der Spannungsharmonischen nicht nur von Traktionsbelastung des Bahnunterwerkes, sondern auch von Innenimpedanz des speisenden 110 kV-Netzes, abhängig sind. Deswegen soll man bei der Grenzwertangaben auch diese Netzinneimpedanzwerte für harmonische Frequenzen angeben.

Unsere komplexe Messungen, die gemeinsam mit Energielieferanten durchgeführt waren, gaben Bestätigung, dass auch im 110 kV-Netz Resonanzen entstehen. Für diese Messungen benützten wir nur geradzählige Frequenzen, die sich in der Netzspannung fast nicht vorkommen, die aber unsere Versuchslokomotive mit ausnahmsweise einpulsiger Gleichrichtung in seinem Primärstrom erzeugte.

Die Spannungsunsymmetrie im 110 kV Freileitungsnetz kann man mittels des Unsymmetriegrades der Spannung durch folgende Formel messen und bewerten:

$$\alpha_U = \sqrt{\frac{A - \sqrt{3A^2 - 6B}}{A + \sqrt{3A^2 - 6B}}},$$

wo:

$$A = U_{R-S}^2 + U_{S-T}^2 + U_{T-R}^2,$$

$$B = U_{R-S}^4 + U_{S-T}^4 + U_{T-R}^4$$

und

$U_{R-S}, U_{S-T}, U_{T-R}$ die Kettenspannungen des Drehspannungssystem [V] sind.

Das Problem der Spannungsunsymmetrie, die bei Einphasensystem entsteht, kann man im ČD – Betrieb nur durch „V“ Schaltungsschema der beiden Bahnunterwerktransformatoren nur teilweise vermindern, auch dafür, daß die Traktionbelastungen der beiden Unterwerktransformatoren dauernd nicht gleich sind. Man kann bessere Lösungen in Fachliteratur finden (Steinmetz, erhöhung der Kurzschlussleistung im 110 kV-Netz), aber diese sind für die ČD aus finanziellen Gründen heute unbrauchbar.

5. Realisierte Maßnahmen der ČD zur Erfüllung der Forderungen, erzielte Ergebnisse und Betriebserfahrungen

Zwei Gründe führten die ČSD und heute ČD die EMV-Eigenschaften des Wechselstromsystems 25 kV, 50 Hz zu verbessern, und zwar:

- finanzielle Gründe,
- technische Gründe.

Der finanzielle Grund ging aus der damaligen Vereinbarung zwischen ČSD und der Energielieferanten hervor, daß bis zum 1990 die ČSD eine Ausnahme aus der Notwendigkeit den Leistungsfaktor auf ein Wert über 0,7 zu verbessern hatten. Deswegen war es ganz unbedeutend, daß die Triebfahrzeuge einen Leistungsfaktor 0,85 ausweisen.

Nach dem Ausnahmeabnehmen mußte man so bald wie möglich technische Lösung für die Leistungsfaktorverbesserung finden und realisieren. Grund dazu war, daß die Energielieferanten Preiszuschläge für elektrische Energie verrechnen begannen. Diese Preiszuschläge wurden aus der Differenz zwischen dem vorgeschriebenen Leistungsfaktorminimalwert (0,95) und dem einmonatlichen Leistungsfaktormittelwert (Angaben MWh und induktiven $Mvarh$ pro Monat) berechnet. In diesem Sinn wurde nicht nur Preis für die monatlich verbrauchte Wirkarbeit (MWh), sondern auch für die höchste viertelstündige Wirkleistung erhöht. kVantitativ es handelte sich um mittlere Preiserhöhung der elektrischen Energie um cca 17%. Kapazitive Blindleistung („Überkompensation“) wurde damals noch nirgends gemessen (gewöhnliche Varstundenzähler sind bei kapazitiver Blindleistung gebremzt) und deshalb nicht verrechnet.

Heute wurden aber fast sämtliche Bahnunterwerke mit Vierquadrantenelektrizitätzähler ausgerüstet und die unverlangene Lieferung der kapazitiven Blindarbeit wird verrechnet.

Der technische Grund lagte in der Notwendigkeit Abnahmebedingungen für elektrische Energie im Sinn der EMV, die damals schon bekannt waren, präventiv zu erfüllen.

Erste Schritte für die Verbesserung der EMV Eigenschaften schlagten Einbau von Kondensatoren entweder auf dem Triebfahrzeug oder parallel der Fahrleitung vor. Beide diese Lösungen haben falsche Resultate gezeigt. Ein Kondensator, der an Zugheitzspannungwicklung des Triebfahrzeugtransformators eingeschaltet war, verschlechterte die EMV-Eigenschaften des Triebfahrzeuges wegen Eigenschwingungen am

Triebfahrzeugtransformator. Automatische Einschaltung eines Kondensators parallel zur Fahrleitung, wenn durch die Fahrleitung Fahrstrom fließt, war theoretisch richtige Lösung, aber im Augenblick der Eischaltung des „leeren“ Kondensators sind unzulässige Überspannungen entstanden.

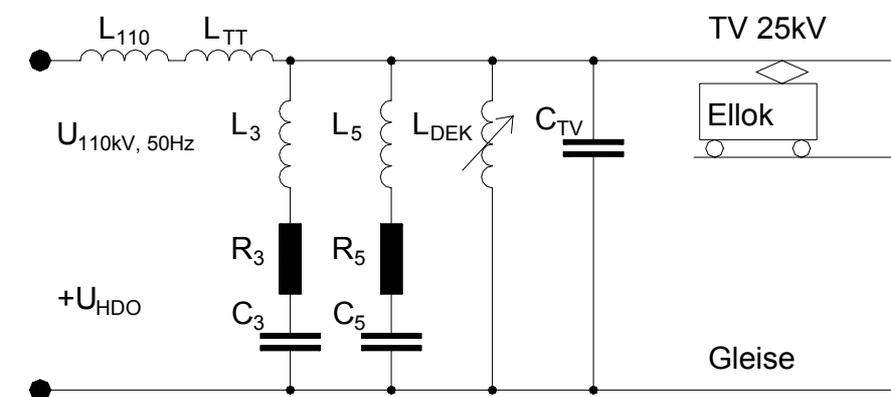
Deswegen wurde festgestellt notwendige Maßnahmen in Bahnunterwerken zu installieren. Diese Bahnunterwerkeinrichtungen (FKZ) sollen vier Tätigkeiten gleichzeitig erfüllen, und zwar:

- ungünstigen Leistungsfaktor des Bahnunterwerkes, der durch Triebfahrzeugen verursacht wird, in vorgeschriebene Grenzen 0,95 bis 1,0 induktiv zu geben,
- unverlangene Lieferung der kapazitiven Blindarbeit zu vermeiden,
- Stromoberwellen des Triebfahrzeuggleichrichters so gut wie möglich kurzzuschließen um die Spannungsüberwellen im Anschlußpunkt des Bahnunterwerkes zu begrenzen,
- Eingangsimpedanz für Arbeitsfrequenz der Energielieferantrundsteuerung des so ergänzten Bahnunterwerkes in vorgeschriebenen Werten zu halten.

Sämtliche Maßnahmen soll man unter eisenbahntechnischen Betriebsbedingungen entwickeln, und zwar:

- für rasch veränderliche Traktionsbelastung des Bahnunterwerkes,
- für veränderliche Speiseabschnittlänge der Fahrleitung.

Allgemein



- TV Fahrleitung
 U_{HDO} Spannung des Rundsteuersystems
 L_{DEK} Ersatzinduktivität des Dekompensationszweiges
 C_{TV} Fahrleitungskapazität

Fig. 3 Ersatzschema der Filtration-Kompensation Anlage (FKZ) für 50 Hz

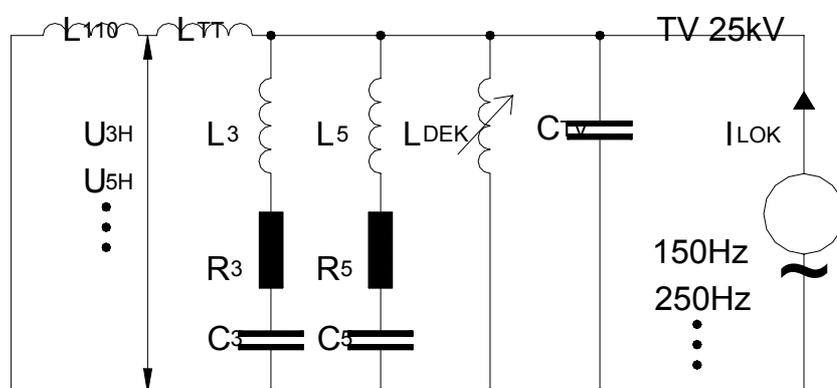


Fig 4 Ersatzschema der Filtration-Kompensation Anlage (FKZ) für Harmonische

Als technische Lösung dieser Aufgabe wurde Variante mit zwei abgestimmten L-C Zweigen, die aneinander parallel zu der Sammelschiene 27 kV des Bahnunterwerkes eingeschaltet sind, erwählt. Für diese Lösung ist eine Abkürzung „FKZ“ üblich.

Diese L-C Zweige enthalten eine Reihenkombination von Luftdrosselspule und Leistungskondensator und sind in die Nähe von Frequenzen der 3. und 5. Harmonischen abgestimmt.

Wir haben einen Rechnerprogram für Bewertung der Spannungs- und Strombelastung der Kondensatorgruppen und Drosselspulen entwickelt. Als Eingangskennndaten für Dimensionierung der L-C Zweigen dienten prozentige Werte der Spektrumkomponenten des Triebfahrzeugstromes, zum Beispiel 35% für 3. Harmonische und 25% für 5. Harmonische. Im Betriebsbedingungen wurden niedrigere Werte erwartet, und zwar 25% für 3. und 10% für 5. Harmonische.

Für die kapazitive Blindleistung (50 Hz) dieser beiden L-C Zweige wurde auf Grund zweijährlicher statistischen Untersuchung ein Wert von 3 Mvar festgestellt.

Die Bahnunterwerkswirkleistungbelastung und auch Blindleistungbelastung sind zeitlich sehr veränderlich. Dagegen bleibt aber die kapazitive Blindleistung der beiden L-C Zweige für 50 Hz zeitlich konstant. Deswegen ist es notwendig im Betriebsfalle einer niedrigen Bahnunterwerkbelastung und davon hervorgehendes niedrigen Blindleistungsbedarfes die Blindleistung der beiden L-C Zweige zu reduzieren.

Zu diesem Zweck wurden zwei Lösungen gewählt, und zwar:

- schaltbare FKZ,
- regulierbare FKZ.

Die schaltbare Konzeption des FKZ ist nur als provisorische Lösung angenommen. In diesem Fall benützt man nur ein L-C Zweig (für 3. Harmonische) und schaltet diesen L-C Zweig mit einem Vakuumschalter ein und aus immer mit gewisser Zeitverspätung in Abhängigkeit von Bahnunterwerkbelastung. Je nach Betriebsbedingungen ist es üblich, daß der Vakuumschalter am meisten einigemal pro Stunde funktioniert. Zukünftig wird diese Lösung nach Ergänzung durch einem L-C Zweig für 5. Harmonische auf regulierbare FKZ ohne Schwierigkeit umgebaut.

Die regulierbare FKZ ist neben der beiden L-C Zweige durch einen dritten sogenannten „Dekompensationszweig“ ausgerüstet. Dieser Zweig fangt mit Transformator 27/5 kV an, deren Sekundärwicklung eine Reihenkombination von Leistungsdrosselspule und statischen Regulator ausweist. Die Leistungsdrosselspule wieder in Luftausführung weist 3,5 Mvar aus. Der statische Regulator arbeitet mit Phasenregulation und gewährleistet notwendige Leistungsfaktorwerte am Eingang des Bahnunterwerkes von der Freileitung 110 kV.

Diese Tätigkeit eines so regulierbaren FKZ kann man wie folgt beschreiben:

- wenn das Bahnunterwerk traktionsseitig unbelastet wird (z. B. keine Triebfahrzeuge oder abgeschalteter Speiseabschnitt der Fahrleitung), dann der Dekompensationszweig soll die ganze kapazitive Blindleistung der beiden L-C Zweige in seine Leistungsdrosselspule annehmen, der statische Regulator ist ganz offen - seine Phasenverschiebung ist approx. Null),
- wenn die Blindleistung der Triebfahrzeuge approx. 3 Mvar erreicht, dann ist der statische Regulator ganz gesperrt, aber der Leistungsfaktor ist noch immer gleich 1,
- für höhere Blindleistungswerte, das heisst für sehr hohe Wirkleistungsbelastungen des Bahnunterwerkes, sinkt der Leistungsfaktor zu 0,95 und ausnahmsweise auch kurzzeitig unter 0,95.

RLF Regulation des Leistungsfaktors
SK Spannungsüberwachungsrelais für Kondensatoren
RV_{max} Überspannungsrelais für Kondensatoren

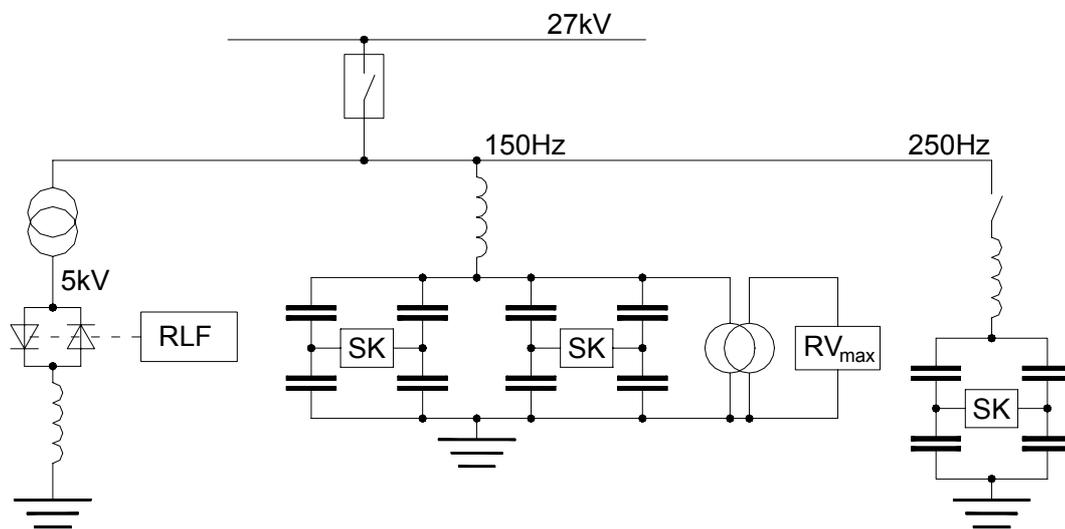


Fig. 5 FKZ mit L-C Zweigen für 3. und 5. Harmonische und mit dem Dekompensationszweig

Die Abstimmungsfrequenz der beiden L-C Zweigen soll man aus technischem und auch ökonomischem Grund sehr sorgfähig wählen. Hier soll man in erster Linie Spannung an der Kondensatorgruppe der L-C Zweige berechnen. Wenn man eine „scharfe“ Abstimmung wählt, das heisst exakt an 150 Hz oder 250 Hz, dann steigt die Kondensatorspannung der abgestimmten Harmonischen gemeinsam mit der 50 Hz-Spannung unangenehm hoch. Auch die resultierende Spannungsharmonische am Anschlusspunkt des Bahnunterwerkes sind wegen dem Kurzschluss der Fahrzeugstromharmonischen überflüssig klein. Gleichzeitig kann eine Gefahr entstehen, daß die 3. und 5. Spannungsharmonischen aus dem 110 kV Netz durch FKZ ausgesaugt und deswegen die FKZ-Komponenten (Kondensatoren) überlastet werden.

Mittels unseres Rechnerprogramms ist es möglich eine kompromisse Wahl des Resonanzwertes zu finden, wo die 3. und 5. Spannungsharmonische noch vorschriftmäßig klein sind und trotzdem die Kondensatorspannung nicht so hoch wird. Das betrifft den L-C Zweig für 3. Harmonische, der auf $2,95 \times 50 \text{ Hz} = 147,5 \text{ Hz}$ abgestimmt wird. Der L-C Zweig für 5. Harmonische kann man „scharf“ auf 250 Hz abstimmen, weil diese Stromharmonische von Triebfahrzeugen nicht mehr groß ist.

Trotzdem ist zu den Anschlussklemmen der Kondensatorgruppe des L-C Zweiges für 3. Harmonische ein Messtransformator für 35/0,1 kV zugeschaltet, der über ein Spannungsschutzrelais diese Kondensatorgruppe gegen Überspannung überwacht. Über die Primärwicklung dieses Messtransformators kann sich die Kondensatorgruppe auch rasch entladen.

Kondensatorgruppen der beiden L-C Zweigen haben zwei reihengeschaltete Teilgruppen und zwei solchen Teilgruppen sind dann parallelgeschaltet und durch Differentialschutz überwacht.

Die Abstimmfrequenz der beiden L-C Zweige darf aber niemals die Frequenzen 150 bzw. 250 Hz überschreiten. Anders kann eine Möglichkeit von Resonanz mit dem Bahnunterwerkstransformator und Überlastung dieser Zweige durch 3. und 5. Harmonisengehalt im Freileitung 110 kV entstehen. Der zweite Grund für solche Abstimmung ist, daß wir bis heute nicht bestimmt wissen, wie sich die elektrische Parameter der L-C Zweige und folgenderweise auch die Resonanzfrequenz der Zweige im Zeitverlauf verändern können.

Die Energielieferanten betreiben ein Rundsteuersystem, das für verschiedene Zwecke ausnützbar ist. Das System arbeitet in der Tschechischen Republik mit Arbeitsfrequenz $216 \frac{2}{3} \text{ Hz}$. Gemäß des „energetischen Gesetzes“ darf der Energieverbraucher das Niveau nicht beeinflussen, das heißt z. B. übermäßig durch die Eingangsimpedanz für die Arbeitsfrequenz dämpfen.

Für das Rundsteuersignal

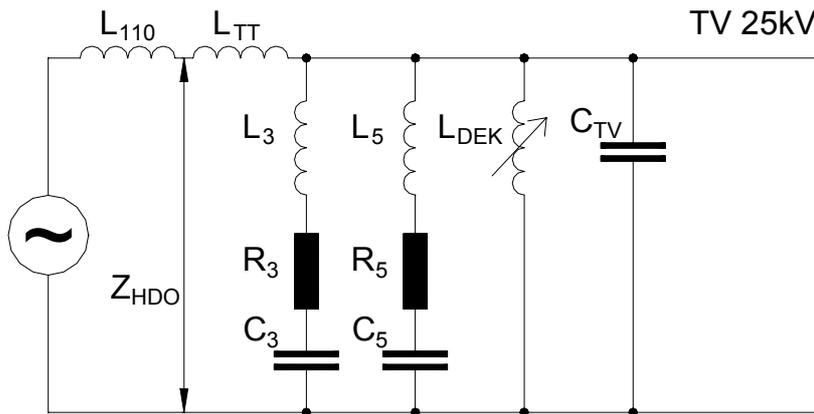


Fig. 6 Ersatzschema des Bahnunterwerkes für Rundsteuerfrequenz

Deswegen war es notwendig die FKZ so dimensionieren um die vorgeschriebene Eingangsimpedanz des ganzen Bahnunterwerkes für die Arbeitsfrequenz gewährleisten zu können. Hier ist wichtig, daß die Arbeitsfrequenz des Rundsteuersystems 216 2/3 Hz zwischen der beiden Resonanzfrequenzen des FKZ, 150 Hz und 250 Hz, liegt.

Dann kann man einen Lehrsatz ausnützen, der sagt: zwischen den Frequenzen der Serienresonanz der beiden L-C Zweigen liegt eine Frequenz der Parallelresonanz. Für diese Parallelresonanzfrequenz dient der 250 Hz-L-C Zweig als ein Kondensator und der 150 Hz-L-C Zweig als eine Drosselspule. Rein theoretisch ist die Eingangsimpedanz so dimensionierter FKZ unendlich und für die Eingangsimpedanz des ganzen Bahnunterwerkes soll man nur die Ersatzimpedanz des Bahnunterwerkstransformators und die Kapazität der gespeisten Fahrleitung berücksichtigen.

Diese Situation wurde rechnerisch untersucht und es wurden Formeln und ein Rechnerprogramm für den Entwurf der L und C Glieder der beiden Zweigen entwickelt.

So hat man folgende allgemein gültige Formeln für die Berechnung der Kapazitäten der C Glieder in Abhängigkeit von der Rundsteuerarbeitsfrequenz zusammengesetzt:

- für den L-C Zweig der 3. Harmonischen:

$$C_3 = \frac{\left[1 - \left(\frac{f_1}{f_3} \right)^2 \right] \left[1 - \left(\frac{f_1}{f_5} \right)^2 \right] \left[\left(\frac{f_H}{f_3} \right)^2 - 1 \right]}{2\pi f_1 \left[1 - \left(\frac{f_1}{f_H} \right)^2 \right] \left[\left(\frac{f_H}{f_3} \right)^2 - \left(\frac{f_H}{f_5} \right)^2 \right]} Q_{\text{komp}} U_{\text{TV}}^2$$

wo:

- C_3 Kapazität der Kondensatorgruppe des L-C Zweiges für die 3. Harmonische [F],
- f_1 Frequenz der Grundwelle [Hz],
- f_3, f_5 Frequenzen der 3. und 5. Harmonischen [Hz],
- f_H Rundsteuerfrequenz [Hz],
- Q_{komp} Kompensationsleistung der beiden L-C Zweigen [var],
- U_{TV} die Fahrleitungsspannung [V],

- für den L-C Zweig der 5. Harmonischen:

$$C_5 = \frac{\left[1 - \left(\frac{f_H}{f_5}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{f_1}{f_3}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{f_1}{f_5}\right)^2\right]}{2\pi f_1 \left[1 - \left(\frac{f_1}{f_H}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{f_3}{f_5}\right)^2\right] \left(\frac{f_H}{f_3}\right)^2} \frac{Q_{\text{komp}}}{U_{\text{TV}}^2},$$

wo:

C_5 Kapazität der Kondensatorgruppe des L-C Zweiges für die 5. Harmonische [F] ist.

Das Verhältnis der Kapazitäten der beiden Kondensatorgruppen C_3 und C_5 kann durch folgender Ausdruck beschrieben werden:

$$C_5 = C_3 \frac{1 - \left(\frac{f_H}{f_5}\right)^2}{\left(\frac{f_H}{f_3}\right)^2 - 1}.$$

Induktivitätswerten der Drosselspulen L_3 und L_5 [H] sind durch folgende Formeln gegeben:

$$L_3 = \frac{1}{(2\pi f_3)^2 C_3}, \quad L_5 = \frac{1}{(2\pi f_5)^2 C_5}.$$

In Betriebssituation wird zum Bahnunterwerk die Fahrleitung mit Gesamtkapazität C_{TV} parallel zugeschaltet. In diesem Fall ändert sich die vorherstehende Formel wie folgt:

$$C_5 = \frac{C_3 \left[1 - \left(\frac{f_H}{f_5}\right)^2\right] - C_{\text{TV}} \left[\left(\frac{f_H}{f_3}\right)^2 + \left(\frac{f_H}{f_5}\right)^2 - \left(\frac{f_H}{f_3}\right)^2 \left(\frac{f_H}{f_5}\right)^2 - 1\right]}{\left(\frac{f_H}{f_3}\right)^2 - 1}$$

Diese Formeln geben idealisierte Kapazitätswerte, die für die unendliche Eingangsimpedanz des Bahnunterwerkes für f_H gelten. Der Rechnerprogramm erlaubt dann Kapazitätswerte, die zu optimierten Induktivitätswerten führen, festzustellen. Als Eingangsdaten für diesem Rechnerprogramm dienen:

- die notwendige Blindleistung des ganzen FKZ,
- betrieblich veränderliche Fahrleitungskapazität,
- Resonanzfrequenzen der beiden L-C Zweige.

Probeweise ist es möglich so eine Lösung zu finden, die den Eingangsimpedanzwert des ganzen Bahnunterwerkes mit realisierbaren und kostfreundlichen Drosselspuleninduktivitäten gewährleisten kann.

Schwierigkeiten kann man in zwei Situationen erwarten, und zwar:

- bei Notwendigkeit auch die 7. Harmonische im 110 kV Spannungsspektrum mittels einen neuen (dritten) L-C Zweig zu begrenzen,
- bei Veränderung der Rundsteuerarbeitsfrequenz seitens des Energielieferanten.

Im ersten Fall wäre eine grundsätzliche Änderung des FKZ notwendig. Man müßte die Komponenten der beiden bisherigen L-C Zweigen so ändern um die Eingangsimpedanz des ganzen Bahnunterwerkes für Rundsteuerfrequenz gewährleisten und um auch die Blindleistung des so ergänzten FKZ mit der Blindleistung des bisherigen Dekompensationszweiges zu vergleichen. Anders müßte man auch den Dekompensationszweig, das heißt seinen Transformator und seine Dekompensationsdrosselspule, auch verändern.

Im zweiten Fall müßte man unterscheiden, ob die neue Rundsteuerarbeitsfrequenz im Bereich zwischen der beiden Resonanzfrequenzen 150 Hz und 250 Hz, oder außerhalb dieses Bereiches, liegen wird. Wenn die neue Rundsteuerfrequenz zwischen 150 Hz und 250 Hz liegen wird, dann ist obenbeschriebene Lösung

theoretisch möglich, aber nach grundsätzlicher Veränderung aller Komponenten der beiden L-C Zweigen, um die Eingangsimpedanz des ganzen Bahnunterwerkes für neue Rundsteuerarbeitsfrequenz zu gewährleisten. Anders müßte man einen zu dem Bahnunterwerk primär- oder sekundärseitig reihengeschalteten Sperrkreis für die Rundsteuerarbeitsfrequenz benützen, der aber für die Nennleistung und die Nennspannung des Bahnunterwerkes ausgestattet werden müßte.

Lektoroval: Prof. Ing. Karel Horák, DrSc.

Předloženo: v březnu 2001

Literaturverzeichnis

- [1] Hlava K.: Schwingungsvorgänge im Traktionsstromkreis. Technisches Dokument DT 92 (ORE Ausschuß A122), 12.1979
- [2] Hlava K.: Die Stromresonanz im Fahrstromkreis des Einphasen-systems 25 kV, 50 Hz mit Kompensation. Bulletin des Eisenbahnforschungsinstitutes Prag, Nr. 7 (1975), S. 7-36
- [3] Hlava K., Havel P.: Die Resonanz im System, welches den Traktionsstromkreis 25 kV, 50 Hz speist. Bulletin des Eisenbahnforschungsinstitutes Prag, Nr. 11 (1976), S. 7-38
- [4] Hlava K., Horák K.: Some considerations on disturbances caused by the single-phase electrical traction system 25 kV, 50 Hz. CIGRÉ (1976), 36-01
- [5] Blaško M., Hlava K., Kabrhel I.: Experimental investigation of harmonic impedances and other electrical parameters of high voltage network. CIGRÉ (1986), 36-01
- [6] Hlava K.: Der Spannungsunsymmetriefaktor und die Dimensionierung des „L-C“ Filtrations-Kompensation Anlage. Bulletin des Eisenbahnforschungsinstitutes Prag, Nr. 49 (1993), S. 63-78
- [7] Topinka J.: Kompensation, Filtration und Symmetrierung in Traktionsbetriebsbedingungen. Elektro, Nr. 5 (1998), S. 9-10
- [8] Hlava K.: Diagnostik des Einflusses des Einspeisesystem der Einphasentraktion der ČD auf das Signal der integrierten Fernsteuerung. Wissenschaftlich-technisches Bulletin der ČD, Nr. 10 (2000), S. 49-59

Resumé

Elektromagnetická kompatibilita trakčních soustav 3 kV DC a 25 kV, 50Hz Českých drah, problémy a řešení

Karel HLAVA

Příspěvek analyzuje tři základní parametry (účinník, obsah proudových harmonických a souměrnost zatížení), které popisují elektromagnetickou kompatibilitu (EMC) obou trakčních soustav Českých drah s ohledem na požadavky dodavatelů elektrické energie.

Pro stejnosměrnou trakční soustavu 3 kV je zdůrazněno, že vzhledem k dvanácti pulznímu schématu trakčního usměrňovače napájecích stanic jsou dnes splněny všechny EMC požadavky dodavatelů elektrické energie.

Naproti tomu pro jednofázovou proudovou soustavu je nutno doplnit všechny trakční napájecí stanice filtračně-kompenzačním zařízením (FKZ) vzhledem k nežádoucím EMC vlastnostem elektrických hnacích vozidel. Jsou popsány dvě konstrukce FKZ doplněné údaji o jejich naladění. Na závěr jsou uvedeny pokyny pro návrh FKZ, které zajišťuje požadovanou hodnotu vstupní impedance napájecí stanice pro kmitočet hromadného dálkového ovládání.

Zusammenfassung

ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT DER TRAKTIONSYSTEMEN 3 KV DC UND 25 KV, 50 HZ DER ČD, PROBLEME UND LÖSUNGEN

Karel HLAVA

In Rahmen der Tschechischen Bahn wurden bis heute fast alle Bahnunterwerke des Einphasentraktionssystem 25 kV, 50 Hz mit Filtration-Kompensation-Anlagen ausgerüstet, am meisten in regulierbarer Ausführung. Nur in einigen Bahnunterwerken wurde provisorisch die ursprüngliche schaltbare Ausführung erhalten.

Alle diese Einrichtungen arbeiten bisher zuverlässig und gewährleisten erwartete Verminderung der Preiszuschläge für die Elektroenergiekosten, die durch unerwünschte Leistungsfaktorwerten der Triebfahrzeuge verursacht sind.

Sehr wertvoll ist die erzielte Begrenzung der Spannungsverzerrung im Verknüpfungspunkt dieser Bahnunterwerken zum 110 kV Netz.

Summary

Electromagnetic compatibility of 3 kV DC and 25 kV, 50 Hz traction system on Czech railways, problems and solutions

Karel HLAVA

The paper analyses three fundamental characteristics (displacement power factor DPF, harmonics and load symmetry), that describe the electromagnetic compatibility (EMC) of both Czech rail traction systems under requirements of the electric energy deliverers.

For the 3 kV DC traction system the paper points out, that all EMC – requirements of the energy deliverers have been fulfilled up to this time owing to using of the 12-pulse traction substation rectifier.

On the other hand a complementation of all traction substations with a filter-compensation-equipment (FKZ) is necessary because of undesirable EMC – properties of the electric motive power. Two constructions of the FKZ are given with instructions for their adjusting. Finally directions are given for FKZ-design that ensured the required traction substation input impedance for the remote control frequency.