

Juraj Altus – Milan Novák – Alena Otčenášová – Michal Pokorný – Adam Szlag *

KVALITATÍVNE PARAMETRE ELEKTRICKEJ ENERGIE ODOBERANEJ ELEKTRICKÝMI DRÁHAMI

QUALITY PARAMETERS OF ELECTRICITY SUPPLIED TO ELECTRIC RAILWAYS

V príspevku sa pojednáva o najzávažnejších nepriaznivých vplyvoch striedavej elektrickej trakcie na kvalitatívne parametre dodávanej elektrickej energie ako sú účinník základnej harmonickej a skutočný účinník, harmonické zložky prúdu a napätia, nesymetria a účinníky v nesymetricky zaťažených vedeniach, flicker efekt - blikanie. Na potvrdenie niektorých záverov v príspevku uvádzame výsledky z merania v trakčnej transformovni ŽSR Nové Zámky a tiež naznačujeme možnosti odstránenia nepriaznivých vplyvov prostredníctvom filtračno-kompenzačnej stanice a pomocou aktívnych filtrov.

1. Úvod

Vzájomným ovplyvňovaním sa jednotlivých zariadení a ich schopnosťou pracovať vyhovujúcim spôsobom vo svojom elektromagnetickom prostredí bez vytvárania neprípustného elektromagnetického rušenia pre čokoľvek v tomto prostredí, sa zaoberá medziodborová vedecko-technická disciplína so všeobecným názvom *elektromagnetická kompatibilita (EMC)*. Jednou z jej súčastí je oblasť zaoberajúca sa kvalitou elektrickej energie.

Za kvalitu elektrickej energie zodpovedá jej dodávateľ (distribútor) aj keď zhoršovanie kvality môže vychádzať z energetických zariadení odberateľa. Preto pri uzatváraní zmlúv na dodávku alebo odber elektrickej energie je potrebná súčinnosť obidvoch zainteresovaných strán. Nemožno sa však spoliehať len na tržné princípy, ale dodávateľ elektrickej energie musí chrániť svoje záujmy a záujmy ostatných odberateľov. Je to možné prostredníctvom určených podmienok pre pripojovanie energetických zariadení (spotrebičov a zdrojov elektrickej energie), medzinárodnými normami a meraním jednotlivých kvalitatívnych parametrov.

V norme STN 50160 „Napäťové charakteristiky elektrickej energie dodávanej verejnými rozvodnými sústavami“ [5] sú definované kvalitatívne parametre elektrickej energie a ich kompatibilné úrovne – dovolené hodnoty pre napäťové úrovne nn a vn.

Za kvalitatívne parametre dodávanej elektrickej energie sa považujú:

The paper analyses the most relevant unfavourable impact of AC electric traction on the quality parameters of supplied electric energy. These are: power factor of fundamental harmonic and power factor, voltage a current harmonic components, unbalance and power factors in asymmetrically loaded lines and flicker. To confirm some propositions, the paper presents results of measurements in traction transformer substation ŽSR Nové Zámky. Also, the possibilities of unfavourable impact elimination using filtering and compensating substation and power active filters are mentioned.

1. Introduction

Various parts of electrical equipment are mutually affected. Each appliance is less or more able to operate satisfactorily in its electromagnetic environment without introducing intolerable electromagnetic disturbances to other appliances placed in the same location. An inter-disciplinary scientific branch generally called Electromagnetic Compatibility (EMC) deals with mentioned problems. One of its parts is the domain dealing with the quality of electricity.

The supplier (distributing company) always guarantees quality of electricity, even in the case when the quality deterioration is caused by the electrical installation owned by a consumer. Hence a cooperation of both parties involved (supplier, consumer) is required during the process of creating an agreement for electricity supply. But the market principles are not the only criterion; a supplier also has to protect its own priorities, and the interests of other consumers. It could come to fruition through the established conditions for connecting electric installations (appliances and electricity sources), international standards and measurement of various quality parameters.

The quality parameters of electricity are defined in the Slovak standard STN 50160 “Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems” [5], together with their compatibility levels, i.e. acceptable values for LV and MV voltage systems.

The following parameters are considered as the quality parameters of electricity:

* ¹Doc. Ing. Juraj Altus, PhD., Doc. Ing. Milan Novák, PhD., Doc. Ing. Alena Otčenášová, PhD., Doc. Ing. Michal Pokorný, PhD.,

²Dr. Adam Szlag El.Eng. MIEE

¹Department of Electric Traction and Energetics, Faculty of Electrical Engineering, University of Žilina, Veľký Diel, 010 26 Žilina, Slovak Republic, E-mail otcenas@fel.utc.sk

²Electric Traction Division, Faculty of Electrical Engineering, Warsaw University of Technology, Plac Politechniki 1, 00-661 Warszawa, Poland, E-mail aszlag@nov.iem.pw.edu.pl

- napätie a jeho odchýlky,
- krátkodobé prerušenia, poklesy a prekročenia menovitých hodnôt napätia,
- účinník základnej harmonickej,
- frekvencia siete,
- nesymetria napätia,
- obsah harmonických zložiek napätí a prúdov,
- medziharmonické,
- rýchle zmeny a kolísanie napätia, miera vnemu blikania (flicker).

Doteraz neboli u nás sledované všetky zmienené kvalitatívne parametre elektrickej energie a spätné vplyvy nelineárnych spotrebičov na napájaciu sieť, avšak tlak na zvyšovanie kvality elektrickej energie núti dodávateľov k ich postupnému meraniu a vyhodnocovaniu.

2. Účinník základnej harmonickej

Dodávca mali Železnice Slovenskej republiky (ŽSR) určité výnimky v dodržiavaní kvalitatívnych parametrov elektrickej energie. V súčasnosti dodávateľia elektrickej energie voči ŽSR uplatňujú rovnaké požiadavky ako voči ostatným odberateľom. Predpokladá sa, že všetky odbery sa budú uskutočňovať pri induktívnom účinníku $\cos\varphi = 0,95$ až 1. Pokiaľ túto záväznú hodnotu účinníka odberateľ nedodrží, platí dodávateľovi cenová prirážka za zvýšenie strát v elektrizačnej sústave.

ŽSR v súčasnosti prevádzkujú elektrickú trakciu pomocou dvoch systémov - jednosmerného a striedavého. Pre jednosmernú elektrickú trakciu platí teoreticky, a je to potvrdené aj mnohými meraniami, že prúdový odber je uskutočňovaný s účinníkom, ktorý je priaznivý a nie je penalizovaný zo strany dodávateľa elektrickej energie. Naproti tomu súčasné hnacie vozidlá striedavej elektrickej trakcie systému 25 kV, 50 Hz dosahujú priemerný účinník okolo hodnoty 0,83.

Potreba jalového výkonu v elektrickej vozbe je ovplyvňovaná hlavne trakčným režimom hnacích vozidiel, s ktorým súvisí magnetizačný prúd transformátora, rozptylová reaktancia transformátora, komutácia usmerňovača s vyhladzovacou tlmivkou a hlavne fázové riadenie tyristorových meničov - usmerňovačov. Magnetizačný prúd transformátora trakčnej transformovne a jeho rozptylová reaktancia, ako aj impedancia trakčného vedenia sa tiež podieľajú na zhoršenom účinníku.

Striedavá elektrická trakcia je typickým veľkým spotrebičom s nesymetrickým odberom elektrickej energie. Stykovým miestom medzi trakčným vedením a elektrickou sieťou energetiky sú trakčné transformovne, ktoré spravidla obsahujú dva trakčné transformátory 110/27 kV. Podľa toho, či pracuje jeden alebo dva transformátory, hovoríme o „T“ alebo „V“ type spojenia. Transformátory sú vždy pripojené na združené napätia vedenia 110 kV (obr. 1) a predstavujú pre sieť značne nesymetrický spotrebič. Účinníky a výkony sú v prípade nesymetrických odberov rôzne na záťaži a vo vedení a na rozdiel od symetrickej záťaže sú rôzne aj v jednotlivých fázach vedenia.

- voltage and its deviation limits,
- short-time voltage interruptions, dips and swells (as related to the voltage nominal value),
- power factor of the fundamental harmonic,
- frequency,
- voltage unbalance,
- content of voltage and current harmonics,
- interharmonics,
- rapid voltage changes and fluctuations, rate of flicker.

Mentioned quality parameters of electricity and negative influences of non-linear appliances upon the electric network were not universally monitored. Present needs for the highest quality parameters force the electricity suppliers to measure and evaluate these quantities.

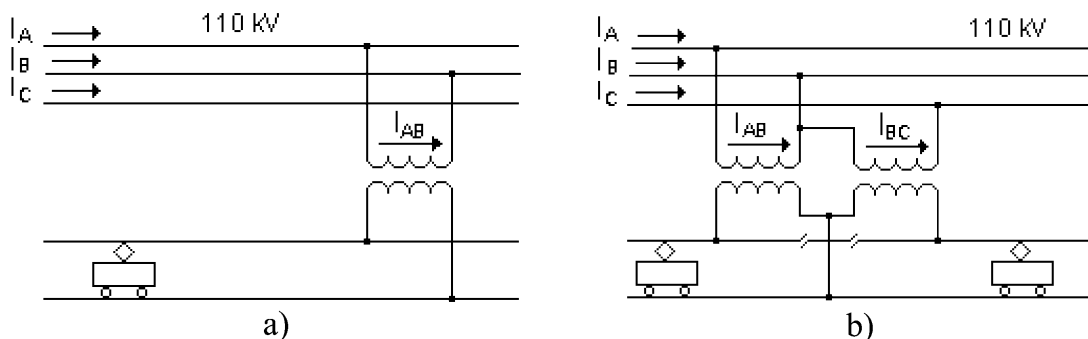
2. Power factor of the fundamental harmonic

For the Railways of Slovak Republic (ŽSR) some exceptions were valid in keeping the quality parameters of electric energy until recently. Now, electricity suppliers call ŽSR to operate under the same rules as other consumers. It is expected that all loads will have inductive power factor within the range of $\cos\varphi = 0.95 - 1$. In this case, when the consumer does not keep these obligatory values of power factor, he is obligated to pay an additional charge to electricity supplier because of the increasing loss in electric network.

ŽSR actually operates electric railways under two different current systems - DC and AC. Current taken off the network by the DC traction system has a favourable power factor. It is confirmed theoretically and also by number of measurements carried out. In this case electricity suppliers do not fine ŽSR for low power factor values. On the other hand, contemporary electric vehicles used in the AC traction system 25 kV, 50 Hz handle an average power factor only around the value of 0.83.

The need of reactive power in the electric traction is affected mainly by the traction mode of electric vehicles. This mode determines magnetizing current of transformer and its leakage reactance, commutation of rectifier with smoothing inductor and the major phase control of thyristor converters - rectifiers. The magnetizing current of the transformer in the traction substation and its leakage reactance as well as the impedance of traction overhead line contribute to the inferior values of power factor.

AC electric traction is the typical big consumer who creates the asymmetrical loads. The points of common coupling between the HV electric network and electric railways are the traction transformer substations usually equipped by two traction transformers 110/27 kV. When only one transformer is in operation, we talk about a "T" connection, in the case of two transformers in operation - "V" connection. Transformers are always connected to the line-to-line voltage 110 kV (Fig. 1) and thus represent a considerable asymmetrical load for the network. In the case of asymmetrical loads the power factors and powers in appliance differ from those in the electric line. Power factors and powers are also different in each phase of the line in contrast to the symmetrical load line.

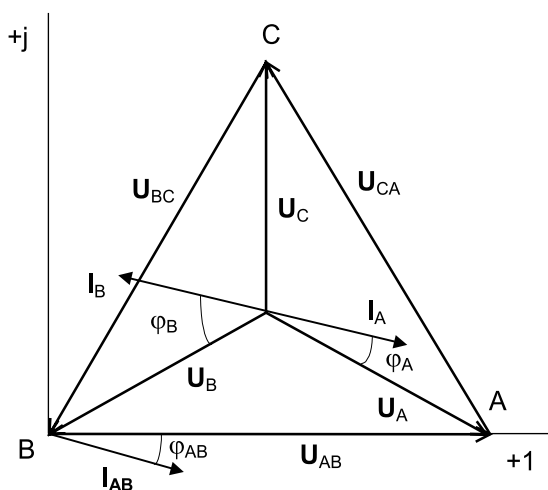


Obr. 1. Pripojenie trakčných transformátorov na vedenie 110 kV, a) T - spojenie, b) V - spojenie
Fig. 1. Traction transformers connection to 110 kV line, a) T - connection, b) V - connection

2.1 Účinníky v nesymetricky zaťažených vedeniach T - spojenie

Uvažujeme jeden jednofázový spotrebič v T - spojení (obr. 1a), pripojený na združené napätie U_{AB} , ktorý odoberá prúd I_{AB} (v harmonickej oblasti) s účinníkom $\cos\varphi_{AB}$ induktívneho charakteru. Induktívny charakter odberov je najbežnejší a dokonca predpisy dodávateľov elektrickej energie kapacitný charakter odberu nepripúšťajú (ako bolo vyššie uvedené). Fázorový diagram napätí a prúdov je na obr. 2. Fázové prúdy, napätia a fázové posuny vo vedení majú označenie s jedným indexom. Z geometrických pomerov na obr. 2 je možné zistiť, že medzi účinníkmi vo fázach vedenia a na spotrebiči platia nasledovné vzťahy

$$\left. \begin{aligned} \cos\varphi_A &= \cos(\varphi_{AB} - 30^\circ) \\ \cos\varphi_B &= \cos(\varphi_{AB} + 30^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$



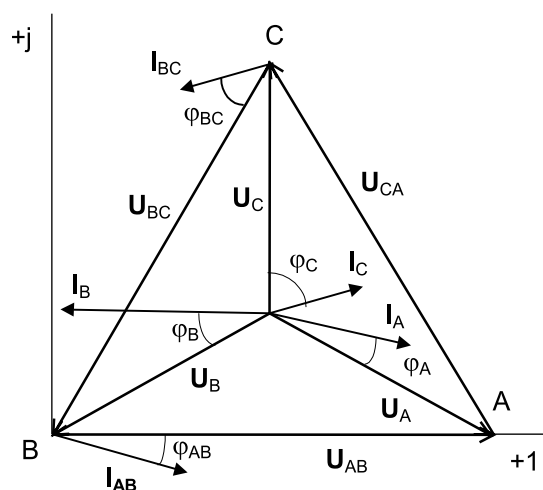
Obr. 2. Fázorový diagram napätí a prúdov pre T - spojenie
Fig. 2. Phasor diagram of voltages and currents for T - connection

Z týchto vzťahov vyplýva, že pri zisťovaní účinníkov vo vedení je možné v niektorej fáze namerať kapacitný charakter účinníka a v inej fáze zasa pomerne nízke hodnoty účinníka induktívneho

2.1 Power factors in asymmetrically loaded lines T - connection

Let's talk about one single-phase appliance in T - connection (Fig. 1a), connected to line-to-line voltage U_{AB} . It takes off the (harmonic) current I_{AB} with inductive power factor $\cos\varphi_{AB}$. Inductive power factor is the most common one and also electricity supplier's rules do not allow capacitive power factors (as mentioned above). Phasor diagram of voltages and currents is in Fig 2. Phase voltages, currents and phase shifts in the line are denoted with one character subscript. It is possible to determine (from the geometrical situation at Fig. 2), that the following formulae are valid between the power factors in the line and phase shifts in the appliance

$$\left. \begin{aligned} \cos\varphi_A &= \cos(\varphi_{AB} - 30^\circ) \\ \cos\varphi_B &= \cos(\varphi_{AB} + 30^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$



Obr. 3. Fázorový diagram napätí a prúdov pre V - spojenie
Fig. 3. Phasor diagram of voltages and currents for V - connection

These formulae indicate that power factor in one phase of the line could have a capacitive value, while the value of the other phase is inductive and low. It is happening even in the case when

charakteru a to aj v tom prípade, že účinník jednofázového spotrebiča je v povolenom pásme 0,95 až 1,00.

V - spojenie

Fázorový diagram pre V - spojenie je na obr. 3. Z geometrických pomerov na tomto obrázku je opäť možné jednoducho zistiť vzťahy pre účinníky krajných fáz A a C

$$\left. \begin{aligned} \cos\varphi_A &= \cos(\varphi_{AB} - 30^\circ) \\ \cos\varphi_C &= \cos(\varphi_{BC} + 30^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Zostáva nájsť vzťah pre účinník v strednej fáze B. I tu sa vychádza z geometrie na obr. 3, pričom je vhodné zaviesť nasledovné označenie pre pomer veľkostí prúdov spotrebičov

$$k = \frac{I_{BC}}{I_{AB}} \quad (3)$$

Všeobecný vzťah pre fázový posun φ_B má tvar

$$\varphi_B = 30^\circ - \arctg\left(\frac{\sqrt{3} \cdot k \cdot \cos\varphi_{BC} - k \cdot \sin\varphi_{BC} - 2 \cdot \sin\varphi_{AB}}{k \cdot \cos\varphi_{BC} + \sqrt{3} \cdot k \cdot \sin\varphi_{BC} + 2 \cdot \cos\varphi_{AB}}\right) \quad (4)$$

Vzťah (4) je možné upraviť s použitím nasledovného označenia pre súčet fázových posunov

$$\sigma = \varphi_{AB} + \varphi_{BC} \quad (5)$$

Zo vzťahu (4) je teraz možné vylúčiť φ_{AB} a dostávame

$$\varphi_B = 30^\circ - \arctg\left[\frac{(tg\varphi_{BC}) \cdot (2 \cdot \cos\sigma - k) + (\sqrt{3} \cdot k - 2 \cdot \sin\sigma)}{(2 \cdot \cos\sigma + k) + (tg\varphi_{BC}) \cdot (\sqrt{3} \cdot k + 2 \cdot \sin\sigma)}\right] \quad (6)$$

V prípade, že veľkosti prúdov oboch záťaží sú rovnaké, t. j. keď $I_{AB} = I_{BC}$ a $k = 1$, nie je hodnota fázového posunu φ_B závislá od jednotlivých fázových posunov záťaže φ_{AB} a φ_{BC} , ale len od ich súčtu, podľa nasledujúceho vzťahu

$$\varphi_B = 30^\circ - \arctg\left(\frac{\sqrt{3} - 2 \cdot \sin\sigma}{1 + 2 \cdot \cos\sigma}\right) \quad (7)$$

V prípade, ak sú obidve záťaže vo V - spojení rovnaké nielen veľkosťou, ale majú aj rovnaké účinníky (t. j. $k = 1$ a $\varphi_{AB} = \varphi_{BC}$), správa sa stredná fáza rovnako ako v prípade súmernej sústavy a pre fázový posun strednej fázy φ_B dostaneme zo vzťahu (7)

$$\varphi_B = 30^\circ - \arctg\left[\frac{\sin(30^\circ - \varphi_{AB})}{\cos(30^\circ - \varphi_{AB})}\right] = \varphi_{AB} \quad (8)$$

Pre uvedené zjednodušené podmienky rovnakých spotrebičov vo V - spojení je na obr. 4 vyneseny priebeh účinníkov v jednotlivých fázach vedenia v závislosti od účinníkov záťaže, ktoré sú induktívneho charakteru (podľa vzťahov (2) a (8)). Účinník vo fáze A mení svoj charakter z kapacitného na induktívny pri poklese účinníka záťaže pod hodnotu 0,866.

the power factor of a single-phase appliance is within the allowed range.

V - connection

Phasor diagram for the V - connection is in Fig. 3. From the geometrical situation at Fig. 3 the following formulae are valid for power factors in the line for phases A, B

$$\left. \begin{aligned} \cos\varphi_A &= \cos(\varphi_{AB} - 30^\circ) \\ \cos\varphi_C &= \cos(\varphi_{BC} + 30^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

The power factor in phase B is to be derived. Here again, the geometrical situation at Fig. 3 is the base for the calculations. The following denotation for the magnitudes of an appliance's currents ratio is advisable

$$k = \frac{I_{BC}}{I_{AB}} \quad (3)$$

A general formula for the phase shift φ_B is

$$\varphi_B = 30^\circ - \arctg\left(\frac{\sqrt{3} \cdot k \cdot \cos\varphi_{BC} - k \cdot \sin\varphi_{BC} - 2 \cdot \sin\varphi_{AB}}{k \cdot \cos\varphi_{BC} + \sqrt{3} \cdot k \cdot \sin\varphi_{BC} + 2 \cdot \cos\varphi_{AB}}\right) \quad (4)$$

Equation (4) can be re-arranged with the use of the following denotation for the sum of the phase shifts

$$\sigma = \varphi_{AB} + \varphi_{BC} \quad (5)$$

Thus φ_{AB} can be eliminated from equation (4), so

$$\varphi_B = 30^\circ - \arctg\left[\frac{(tg\varphi_{BC}) \cdot (2 \cdot \cos\sigma - k) + (\sqrt{3} \cdot k - 2 \cdot \sin\sigma)}{(2 \cdot \cos\sigma + k) + (tg\varphi_{BC}) \cdot (\sqrt{3} \cdot k + 2 \cdot \sin\sigma)}\right] \quad (6)$$

In the case when magnitudes of both appliances are equal, i.e. when $I_{AB} = I_{BC}$ and $k = 1$, the value of phase shift φ_B does not depend on the values of each phase shift of the appliances φ_{AB} and φ_{BC} , but only on their sum, according to the following formula

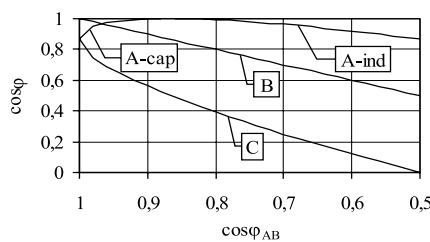
$$\varphi_B = 30^\circ - \arctg\left(\frac{\sqrt{3} - 2 \cdot \sin\sigma}{1 + 2 \cdot \cos\sigma}\right) \quad (7)$$

In the case when both V - connected loads are equal not only by current magnitudes but also by their power factors (i.e. $k = 1$ and $\varphi_{AB} = \varphi_{BC}$), phase B acts the same way as for the symmetrically loaded line.

Formula for the phase shift φ_B of phase B can be derived from equation (7)

$$\varphi_B = 30^\circ - \arctg\left[\frac{\sin(30^\circ - \varphi_{AB})}{\cos(30^\circ - \varphi_{AB})}\right] = \varphi_{AB} \quad (8)$$

Fig. 4 presents graphs of power factors of the phases of the line vs. power factor of the load (which is of inductive character) - for above mentioned simplified conditions - two equal appliances. The graphs were calculated in accordance with equations (2) and (8). Power factor in phase A changes its capacitive character to inductive one when the load power factor decreases below 0.866.



Obr. 4. Účinníky vo fázach vedenia pre dva rovnaké spotrebiče vo V - spojení
Fig. 4. Power factors in the line for two equal appliances in V - connections

3. Harmonické zložky napätia a prúdu

Ďalším kvalitatívnym ukazovateľom, ktorý má byť v najbližšej budúcnosti sledovaný zo strany energetiky, je dodržiavanie kompatibilných úrovní obsahu harmonických napätí v dohodnutom spoločnom napájacom bode. Toto obmedzenie bude znamenať, že odberné zariadenie pripojené na rozvodné zariadenie dodávateľa bude musieť byť vybavené dostupnými technickými prostriedkami obmedzujúcimi vplyv spätného pôsobenia na kvalitu dodávanej elektrickej energie ostatným odberateľom a nesmie ovplyvňovať funkciu riadiacej, meracej a zabezpečovacej techniky a činnosť systému hromadného diaľkového ovládania.

Jednosmerná elektrická trakcia teoreticky, ale opäť aj na základe meraní, nie je pôvodcom významných harmonických zložiek prúdu a následne napätia, čo je zdôvodniteľné tým, že v trakčnej meniarňi je trojfázový usmerňovač s dvanásť impulzovým usmernením.

Usmerňovač umiestnený na hnacom vozidle striedavej trakčnej prúdovej sústavy predstavuje zdroj prúdových harmonických, čo je potvrdené meraniami aj simulačnými experimentami. Pretože ide o jednofázový menič s dvojiimpulzovým usmernením, spektrum prúdu odobieraného jednofázovým rušňom obsahuje minimálne všetky nepárne násobky základnej frekvencie 50 Hz. Veľkosť prúdových harmonických je približne nepriamo úmerná rádu harmonickej.

Veľkosť harmonických zložiek prúdu v trakčnej transformovni však závisí nielen od veľkosti prúdových harmonických rušňa, ale aj od konfigurácie napájaného obvodu. Prenosové cesty harmonických prúdu rušňa ako zdroja predstavujú elektrický R-L-C obvod s rozloženými parametrami, v ktorom dochádza vplyvom vlastností prvkov trakčného vedenia, trakčného transformátora a nadradenej sústavy k paralelnej aj sériovej rezonancii. Frekvencia, pri ktorej dochádza k paralelnej rezonancii, závisí predovšetkým od dĺžky napájaného úseku, od parametrov trakčného vedenia a transformátora trakčnej transformovne. So vzrastom dĺžky napájaného úseku frekvencia rezonancie klesá [1], [2].

Pri paralelnej rezonancii napájacej sústavy impedancia zodpovedajúca rezonančnej frekvencii dosahuje hodnoty rádovo desiatok k Ω . Potom harmonické zložky prúdu elektrických hnacích vozidiel (rádovo jednotky ampérov), blízke rezonančnej frekvencii napájacej sústavy, vyvolávajú napätové kmity, ktoré na konci vedenia môžu dosiahnuť pre rezonančnú frekvenciu niekoľko kV. Na začiatku vedenia prenikajú cez trakčný transformátor do elektrizačnej sústavy.

Prúdové harmonické produkované rušňom, zodpovedajúce rezonančnej frekvencii, sú v napájacom obvode niekoľkonásobne zosilňované. Cez trakčný transformátor sa prúdové harmonické prenesú na jeho primárnu stranu.

Metodika výpočtu šírenia harmonických zložiek prúdu trakčným vedením a modelovanie napájania striedavej trakčnej prúdovej sústavy sú uvedené v [1], [2].

Trakčný obvod, z ktorého hnacie vozidlo odoberá výkon, je možné všeobecne považovať za elektricky dlhé vedenie, dané pre-

3. Harmonic components of voltage and current

The next quality parameter, which will be monitored by electricity distributing companies in the near future, is the meeting of compatible levels of the content of voltage harmonics in the points of common coupling. It means that any appliance connected to the distribution network operated by a given electricity supplier will have to be equipped by available technological means for reduction of backward influence of the appliance on the quality of the electricity supplied to other consumers. The appliance is also not allowed to affect the functioning of control, measurement and security technologies and ripple control system.

DC electric traction system is not the source of any considerable current harmonic components (consequently nor voltage harmonics). It could be proved by calculations and is also proved by number of measurements accomplished (12-pulse, 3-phase rectifiers are used in the traction substations).

A rectifier placed in the electric vehicle of an AC traction system stands for the source of current harmonics – this is proved theoretically and also by accomplished measurements and simulation experiments. The thing is that the rectifier is the single-phase converter with 2-impulse rectification. So the spectrum of the current taken off by the single-phase vehicle includes at least all odd multiples of the fundamental frequency 50 Hz. The magnitudes of current harmonics are (approximately) proportional to the inverse values of harmonic order.

The magnitudes of current harmonics in the traction transformer substation do not depend on the magnitudes of the current harmonics of the vehicle only, but also on the supply circuit configuration. Transmission path of the current harmonics from the source (vehicle) represents electric R-L-C circuit with distributed parameters. In that circuit the serial and parallel resonance can occur as a result of the nature of elements of a traction overhead line, traction transformer and HV electric network. Primarily, the lengths of the supplied section, parameters of traction overhead line and traction transformer affect the frequency of parallel resonance. For longer length of the supplied section the resonance frequency decreases [1], [2].

The impedance of the supply circuit can reach values of tens of k Ω at the parallel resonance conditions. Then, the current harmonics produced by the electric vehicles (approximately amperes) close to resonance frequency cause voltage oscillations, which can reach the values of some kV at the end of the section (for the resonance frequency). These oscillations penetrate the electric network via the traction transformer.

Current harmonics produced by the electric vehicles at the resonance frequency are amplified in the supply circuit. Current harmonics are transformed via the traction transformer to its primary side.

Calculation methodology of current harmonic propagation via traction overhead lines and modeling of the AC traction supply system are introduced in [1], [2].

A traction circuit that supplies electric vehicles is mainly created by traction overhead line, which can be considered as

dovšetkým trakčným vedením, ktoré je buďené v niektorom bode z prúdového zdroja harmonických, ktorý predstavuje hnacie vozidlo. Pri jednostrannom napájaní (charakteristické pre striedavú trakčnú prúdovú sústavu), je jeden koniec tohto dlhého vedenia otvorený, druhý koniec je pripojený k sekundárnemu vinutiu trakčného transformátora v trakčnej transformovni.

Náhradný obvod pre zisťovanie spektra prúdu odoberaného hnacím vozidlom a spektra prúdu v napájači trakčnej transformovne potom pozostáva z týchto častí:

- náhradná schéma nadradenej sústavy,
- náhradná schéma trakčnej transformovne,
- náhradná schéma trakčného vedenia,
- náhradná schéma otvoreného konca trakčného vedenia.

Náhradný model je nutné uvažovať pre každú harmonickú zvlášť, nakoľko parametre obvodu sú frekvenčne závislé.

4. Skutočný účinník (faktor výkonu)

Skutočný *zdanlivý výkon* v jednofázovej sústave s deformovateľným prúdom a napätím je daný rovnicou

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} = \sqrt{P^2 + P_f^2} \quad (9)$$

kde P je *činný výkon* harmonických zložiek prúdu a napätia toho istého rádu k a predstavuje súčet činných výkonov jednotlivých harmonických

$$P = \sum_{k=0}^{\infty} U_{fk} \cdot I_k \cdot \cos\varphi_k = \sum_{k=0}^{\infty} P_k, \quad (10)$$

Q je *jalový výkon* harmonických zložiek prúdu a napätia toho istého rádu k a predstavuje súčet jalových výkonov jednotlivých harmonických

$$Q = \sum_{k=0}^{\infty} U_{fk} \cdot I_k \cdot \sin\varphi_k = \sum_{k=0}^{\infty} Q_k, \quad (11)$$

D je *deformačný výkon*

Deformačný výkon súvisí s deformáciou kriviek prúdu a napätia voči harmonickému priebehu. Nulový je vtedy, ak krivka napätia a prúdu obsahuje tie isté harmonické, pričom pomer efektívnych hodnôt napätia a prúdu je pre každú harmonickú rovnaký, t. j. komplexná impedancia obvodu je frekvenčne nezávislá. Deformačný výkon je spolu s jalovým výkonom základnej harmonickej odoberaný zo siete a patrí medzi neaktívne výkony. Nevykonáva prácu a podieľa sa na stratách výkonu.

a electrically long line. This line is fed in a given point by the current source of the current harmonic components - by the vehicle. Usually used one-side feeding (typical for AC electric traction) means, one end of that long line is opened, while the other end is connected to the secondary winding of the traction transformer in the substation.

An equivalent electric circuit used for investigation of the current spectrum of electric vehicle and current spectrum of the substation's feeder consists from the following elements

- equivalent circuit of HV electric distribution system,
- equivalent circuit of traction substation,
- equivalent circuit of traction overhead line,
- equivalent circuit of the open end of traction overhead line.

An equivalent model has to be created for each harmonic order separately, as the circuit parameters are frequency dependent.

4. Power factor

An actual *apparent power* in a single-phase system with distorted current and voltage is given by following formula

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} = \sqrt{P^2 + P_f^2} \quad (9)$$

where P is the *active power* of the harmonic components of current and voltage of the same order k and represents sum of real powers of single harmonics

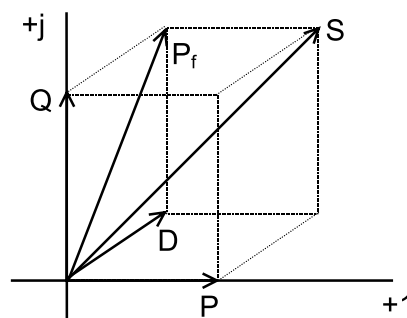
$$P = \sum_{k=0}^{\infty} U_{fk} \cdot I_k \cdot \cos\varphi_k = \sum_{k=0}^{\infty} P_k, \quad (10)$$

Q is the *reactive power* of the harmonic components of current and voltage of the same order k and represents sum of reactive powers of single harmonics

$$Q = \sum_{k=0}^{\infty} U_{fk} \cdot I_k \cdot \sin\varphi_k = \sum_{k=0}^{\infty} Q_k, \quad (11)$$

D is the *deformative power*

$$D = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} [U_{fk}^2 \cdot I_l^2 + U_{fl}^2 \cdot I_k^2 - 2 \cdot U_{fk} \cdot U_{fl} \cdot I_k \cdot I_l \cos(\varphi_k - \varphi_l)]} \quad (12)$$



Obr. 5. Vzťahy medzi výkonomi
Fig. 5. Relations among powers

Deformative power is connected with current and voltage waveshape distortion compared to harmonic (sinusoidal) shape. Its value is equal to zero in the case, when both voltage and current curve contain the same harmonic components and the ratio between RMS values of voltage and current is the same for harmonics of all orders - i.e. complex circuit impedance does not depend on frequency. Both deformative power and reactive power of fundamental harmonic taken off the network are non-active powers. They do not produce electric work, but take a part on creation of losses.

P_f je fiktívny výkon.

Vo všeobecnej trojfázovej sústave je celkový činný a jalový výkon daný opäť súčtom týchto veličín pre jednotlivé harmonické vo všetkých troch fázach.

Pomer činného výkonu k zdanlivému pre neharmonické priebehy sa nazýva *skutočným účinníkom (faktorom výkonu)* a označuje sa λ (na rozdiel od účinníka základnej harmonickej $\cos\varphi_1$)

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt}{\sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T u^2(t) dt} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2(t) dt}} = \frac{\sum_{k=0}^{\infty} U_{fk} \cdot I_k \cos\varphi_k}{\sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_{fk}^2} \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} I_k^2}} \quad (13)$$

kde $u(t)$ a $i(t)$ sú časové priebehy neharmonického napätia a prúdu.

Vzájomný vzťah medzi $\cos\varphi$ (účinníkom základnej harmonickej, index „1“ sa obvykle vynecháva) a λ je daný nasledujúcim výrazom

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos\varphi \cdot g_i \quad (14)$$

kde g_i je činiteľ deformácie, definovaný ako pomer efektívnej hodnoty základnej harmonickej prúdu k efektívnej hodnote deformovaného prúdu.

Pretože trakčný prúd odoberaný hnacím vozidlom striedavej elektrickej trakcie je značne skreslený harmonickými prúdu, je následne aj skutočný účinník λ o 10 až 15 % nižší oproti $\cos\varphi$ - účinníku základnej harmonickej. Jednosmerná trakcia opäť nespôsobuje nepríjemnosti s ohľadom na uvádzaný parameter.

5. Nesymetria

K ďalším kvalitatívnym parametrom, ktorých porušenia zatiaľ nie sú finančne postihované, patrí hodnota činiteľa napätbovej nesymetrie. Dodávatelia elektrickej energie by mali rozdeľovať povolené 2 % činiteľa napätbovej nesymetrie v dohodnutom spoločnom napájacom bode v pomere výkonu odoberaného jedným odberateľom k prenosovým možnostiam daného bodu. Takto určené percento zníženia povoleného odoberaného výkonu sa uplatňuje i v prípade, keď v spoločnom napájacom bode je len jediný odberateľ. Aj pri meraní nesymetrie je problém jednoznačne oddeliť vplyv daného odberateľa od „pozadia napájacej sústavy“. Mnohé merania preukázali, že jednofázový trakčný odber nie je jediný, ktorý napätbovú nesymetriu spôsobuje.

Norma STN EN 50160 uvádza, že v priebehu normálneho prevádzkového stavu má byť počas každého obdobia jedného týždňa 95 % 10-minútových stredných efektívnych hodnôt spätnej zložky napájacieho napätia v rozsahu 0 až 2 % súslednej zložky. Teoreticky sa činiteľ prúdovej nesymetrie pre striedavú elektrickú trakciu môže pohybovať v rozpätí od 0 do ∞ %, podľa veľkosti a fázových uhlov nesymetrickej záťaže. Následná napätbová nesymetria (dôsledok prúdovej) závisí od trojfázového skratového výkonu v mieste pripojenia odberateľa. Približný vzťah pre výpočet napätbovej nesymetrie pre jednofázový odber je možný podľa vzťahu:

P_f is the fictitious power.

In general, 3-phase system the overall active and reactive powers are again the sums of respective powers of single harmonics for all three phases.

The ratio between active and apparent powers for non-harmonic quantities is denoted as power factor λ . (contrary to power factor of fundamental harmonic $\cos\varphi_1$)

where $u(t)$ and $i(t)$ are the instantaneous values of distorted voltage and current.

The relationship between $\cos\varphi$ (power factor of fundamental harmonic, subscript “1” is usually omitted) and λ is described by following formula

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos\varphi \cdot g_i \quad (14)$$

where g_i is the distortion factor, defined as the ratio between effective value of current fundamental harmonic to effective value of distorted current.

As the traction current supplied to an AC electric traction vehicle is considerably distorted by current harmonics, the power factor λ is then by 10 - 15 % lower than power factor of fundamental harmonic $\cos\varphi$. A DC electric traction does not cause any specific problem connected with mentioned parameter.

5. Unbalance

Another quality parameter - voltage unbalance is not monitored yet and consumers are not fined for exceeding the limits of coefficient of voltage unbalance. Electricity suppliers should divide an allowable range of 2 % of coefficient of voltage unbalance in the point of common coupling according to the ratio of the load of the given consumer to the maximum load that could be coupled at that point. The percentage reduction of the load determined this way comes into play also when only a single consumer at the point of common coupling is coupled. Generally, it is not easy to separate the influence of the given consumer from the “background of network” during the measurement of unbalance. A number of measurements proved that traction load is not the only load causing voltage unbalance.

According to the standard STN EN 50160 a negative sequence component of the voltage should be within the range of 0 - 2 % of the positive sequence component of the voltage at normal operation. This must be satisfied for at least 95 % of medium values of effective values of voltages, calculated for 10-minute periods. According to the magnitudes and phase angles of asymmetrical load, coefficient of current unbalance for electric traction load can theoretically reach the values of 0 to ∞ %. Follow up voltage unbalance (as a consequence of current unbalance) depends on the 3-

$$\rho_u = \frac{S_{AB}}{S''_{k3}} \cdot 100 \quad (15)$$

kde S_{AB} je zdanlivý výkon odobraný jednofázovým spotrebičom pri menovitom napätí,

S''_{k3} je súmerný trojfázový skratový výkon siete v mieste pripojenia jednofázového odberu.

Tento vzťah umožňuje pomerne jednoducho odhadnúť veľkosť napätovej nesymetrie, pretože veľkosti skratových výkonov v dôležitých bodoch elektrizačnej sústavy má prevádzkovateľ k dispozícii a pri zmenách konfigurácie siete ich priebežne aktualizuje. Výpočet skratových výkonov v mieste pripojenia je potom možný, ak poznáme parametre jednotlivých prvkov sústavy.

Ďalší známy vzťah umožňuje výpočet súčiniteľa napätovej nesymetrie iba na základe znalosti veľkosti združených napätí

$$\rho_u = \sqrt{\frac{U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2 - \sqrt{3} \cdot (U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2 - 6 \cdot (U_{AB}^4 + U_{BC}^4 + U_{CA}^4))}{U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2 + \sqrt{3} \cdot (U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2 - 6 \cdot (U_{AB}^4 + U_{BC}^4 + U_{CA}^4))}} \cdot 100 (\%) \quad (16)$$

Tento vzťah je možné s úspechom použiť najmä pri meraní nesymetrie, pretože nepotrebujeme poznať polohu fázorov v Gaussovej rovine. Platí obdobne aj pre sústavu prúdov, pričom sa aplikuje na prúdy vo fázach vedenia.

Z pohľadu hodnotenia nesymetrie spôsobenej elektrickou trakciou je možné tvrdiť, že jednosmerná elektrická trakcia nie je pôvodcom nesymetrie v trojfázovom napájanom vedení, pretože obvyčajne v trakčnej meniarni je symetrický trojfázový menič s dvanásť impulzovým usmernením. Striedavá elektrická trakcia v niektorých prípadoch, hlavne pri väčšom trakčnom odbere, môže spôsobiť napätovú nesymetriu väčšiu ako je dovolená hodnota 2 % stanovená normou STN 50160 [5].

6. Flicker efekt - blikanie

Ďalšou požiadavkou, ktorá je spoločná pre obe trakčné prúdové sústavy, je tlak dodávateľa elektrickej energie na zrovnomenenie odobraného výkonu teoreticky na konštantnú hodnotu z dôvodu odstránenia javu zvaného flicker efekt - blikanie. Ide o odstránenie nepríjemného vnemu kolísania intenzity osvetlenia spôsobeného blikaním žiaroviek v dôsledku rýchlych zmien napájacieho napätia, ktoré je v tomto prípade spôsobené práve veľkým premenlivým odberom, ktorý je charakteristický pre elektrickú trakciu.

Na základe výsledkov merania však nebol zistený stav, pri ktorom by boli prekročené stanovené číselné hodnoty pre blikanie dané normou. Je skutočnosťou, že počas celej doby prevádzky obidvoch trakčných prúdových sústav nebol pozorovaný ani v trakčných napájaných stanicích negatívny vnem blikania svetla žiaroviek a práve tu by mal byť tento jav najviac pozorovateľný. Mohol by nastať v mieste nie dostatočne „tvrdej“ siete dodávateľa a jednoznačným technickým riešením pre odstránenie tohoto

phase short circuit power in the point where consumer is coupled. An approximate formula for coefficient of voltage unbalance calculation for single-phase load is as follows

$$\rho_u = \frac{S_{AB}}{S''_{k3}} \cdot 100 \quad (15)$$

where S_{AB} is the apparent power of single-phase load at nominal voltage,

S''_{k3} is the symmetrical 3-phase short circuit apparent power of the network in the point, where the single-phase load is coupled.

The mentioned equation helps to easily estimate the values of voltage unbalance as the values of short circuit powers in important points of the network are well known and network operators actualize these values regularly. Calculations of short circuit powers in the points of common coupling are then possible if the parameters of elements of network are known.

Another well-known formula allows calculation of coefficient of voltage unbalance using only line-to-line voltages

This equation is frequently used mainly for voltage unbalance measurement as the position of phasors in Gauss plane need not to be identified. It is also valid for currents when applied to the phase currents of the line.

From the point of view of the voltage unbalance caused by electric traction, the DC electric traction does not create unbalance in the HV network, as the traction rectifier substation usually comprises symmetrical 3-phase 12-pulse converter. An AC electric traction can cause voltage unbalance of more than 2 % allowed by standard STN 50160 [5], mostly during the periods of heavy traction load.

6. Flicker

Further, a requirement common for both traction current systems is the variability of power taken off the network. Electricity suppliers force ŽSR to have as steady load currents as it is possible to cut down the phenomena called flicker. The reason for it is the elimination of the uncomfortableness caused by illumination intensity fluctuations as a result of rapid feeding voltage changes. These changes are here in pursuance of the big variable traction loads, which are specific for electric railways.

During various measurements carried out, the states were not detected when compatible numerical levels valid for flicker given by standard are exceeded. As a matter of fact, the displeasing perceptions of electric bulbs light fluctuations were not observed even in traction substations (where should mostly be expected) during the whole period of electric railways of both current systems operation. Described phenomenon could occur in the point of relatively "soft" supply HV network. In that case, increas-

vplyvu spôsobeného trakčným odberom by bolo zvýšenie skratového výkonu v spoločnom napájacom bode tejto siete.

7. Netrakčný odber ŽSR

Problematika netrakčných odberov sa dnes ešte nejaví taká závažná z hľadiska elektromagnetickej kompatibility ako je odber pre elektrickú trakciu. Nie sú tu v súčasnej dobe problémy s harmonickými vzhľadom na charakter a množstvo spotrebičov. Problém môže nastať pri používaní výbojkového osvetlenia alebo spotrebičov s usmerňovačmi a spínanými zdrojmi (napr. úsporné žiarivky). Induktívny účinník je pri netrakčných odberoch udržiavaný v povolených medziach bez problémov kompenzovaním jednotlivých spotrebičov alebo kompenzačnými rozvádzačmi pri väčších odberoch.

Problémom však začína byť nevyžiadaná dodávka elektrickej energie s kapacitným účinníkom, ktorá zatiaľ nemá, ale mala by mať v cenníku elektrickej energie samostatnú sadzbu vo forme cenovej prírážky k základnej cene energie, a to za každú kvar.h. V čase rekonštrukcie napájacej siete v železničných staniách a uzloch boli v minulosti nové káblové rozvody dimenzované s veľkou rezervou. A práve prevádzka takto dimenzovaných, menej zaťažených a nekompenzovaných káblových sietí spôsobuje dnes problémy. Z týchto dôvodov sú ŽSR následne nútené kompenzovať káblové rozvody v železničných staniách a uzloch.

8. Príklady nameraných hodnôt

Na potvrdenie niektorých z predchádzajúcich konštatovaní sú ďalej uvedené výsledky merania v trakčnej transformovni ŽSR Nové Zámky. Merania prúdov a napätí sa vykonali pomocou analyzátora TOPAS 1000 prepojeného s počítačom. Pri meraní bol analyzátor pripojený cez prístrojové transformátory prúdu a napätia na výstupe transformátorov 110/27 kV T1 a T11. Meranie prebiehalo v novembri roku 2000 počas troch dní. V čase merania bolo potrebné pre poruchu na 110 kV priechodke transformátora 110/27 kV vypnúť rozvodňu 110 kV na 5,5 hodín.

Jednopolová schéma zapojenia trakčnej transformovne je uvedená na obr. 6, kde sú zároveň vyznačené miesta, v ktorých boli vykonané merania. Na ďalších obrázkoch sú časové priebehy meraných veličín: zdanlivý výkon odoberaný transformátormi T1 a T11 (obr. 7), účinník základnej harmonickej v oboch meracích miestach (obr. 8), faktor výkonu v oboch meracích miestach (obr. 9), THD v oboch meracích miestach pre napätie

ing the short circuit power at the point of common coupling in distributing network could eliminate flicker.

7. Non-tractive consumption of ŽSR

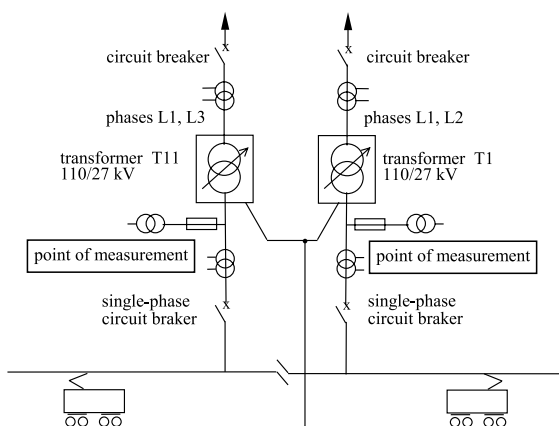
From the point of view of EMC the problems of non-tractive consumption does not seem to be as important today as tractive consumption. Regarding the amount and character of existing appliances, the occurrence of harmonics is negligible. In the future some troubles can be expected in connection with massive usage of discharge lamps or appliance with rectifiers and switched sources (e.g. compact fluorescent lamps). The power factor (inductive) for non-tractive consumption is kept by compensating for single appliances or by using compensating switchboards for bigger groups of appliances without problem.

The problem, which will have to be handled, appears to be a disagreed take off of electricity with capacitive power factor. Such an item is not yet included in the electricity price list, but it should be as a separate entry in the form of supplementary charge to the basic charge of electricity - for each kvar.h. Electricity distribution cables in railway stations and in railway junctions, which were re-constructed, are designed with considerable redundancy. Operation of such over-equipped, little-loaded and non-compensated cable networks is the source of problems today. Hence ŽSR is forced to compensate cable networks in railway stations and in railway junctions.

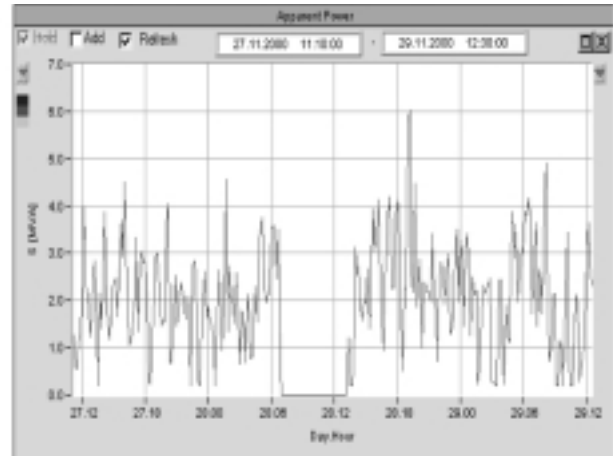
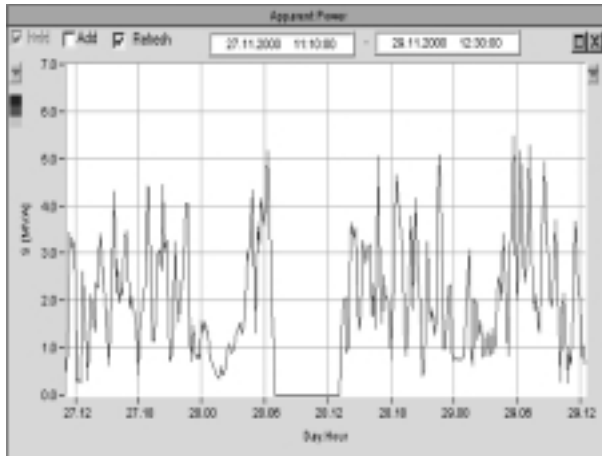
8. Examples of measured values

To confirm some of above-mentioned propositions this section presents results of measurements carried out in the traction transformer substation ŽSR Nové Zámky. Voltage and current measurement were executed using analyzer TOPAS 1000 connected to a personal computer. The analyzer was during measurement connected via instrument voltage and current transformers to the secondary of transformers 110/27 kV T1 and T11. Measurements lasted three days in November 2000. During that time 110 kV switchgear was disconnected for 5.5 hours. The reason was the failure of 110 kV bushing of a 110/27 kV transformer.

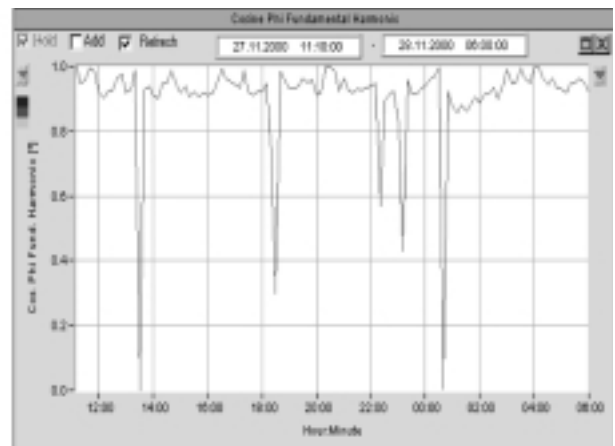
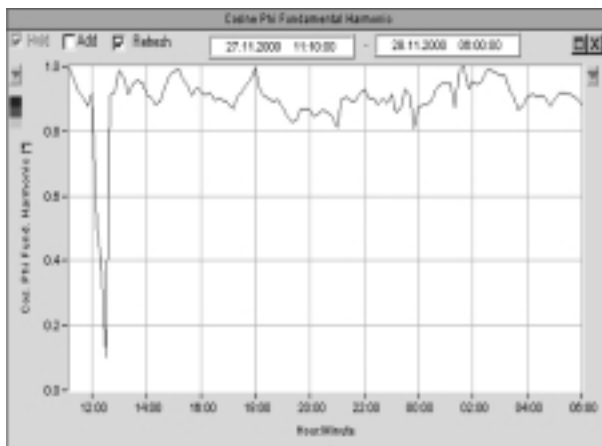
A single-pole diagram of traction substation is in Fig. 6, where the points of measurement are marked out. The following figures show the time variability of measured quantities: apparent power of transformers T1 and T11 (Fig. 7), power factor of fundamental harmonic in both points of measurement (Fig. 8), power factor in both points of measurement (Fig. 9), voltage and current THD in both points of measurement (Fig.



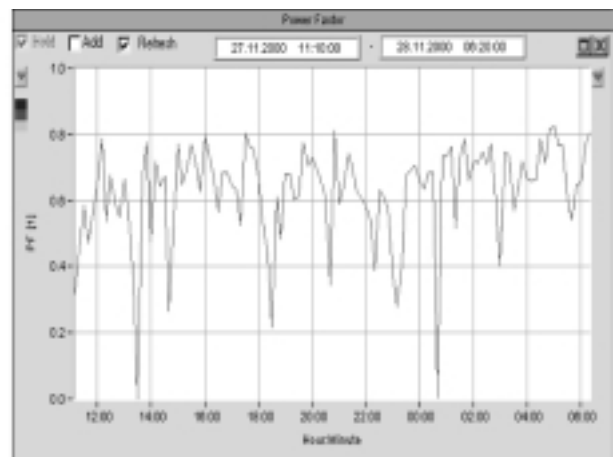
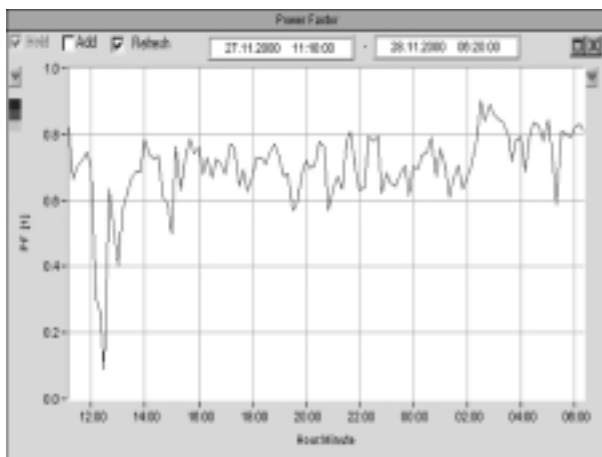
Obr. 6. Jednopolová schéma trakčnej transformovne Nové Zámky
Fig. 6. Single-pole diagram of traction substation Nové Zámky



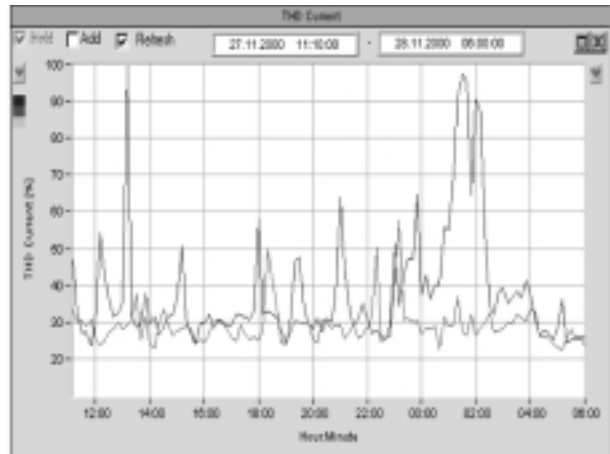
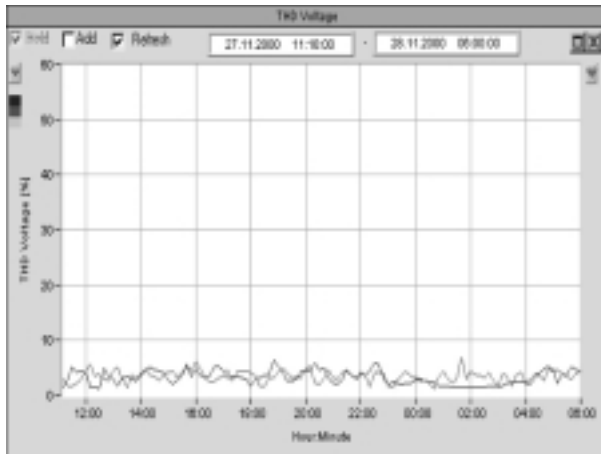
Obr. 7. Priebeh zdanlivého výkonu odoberaného transformátormi T1 a T11
Fig. 7. Apparent power of transformers T1 and T11 vs time



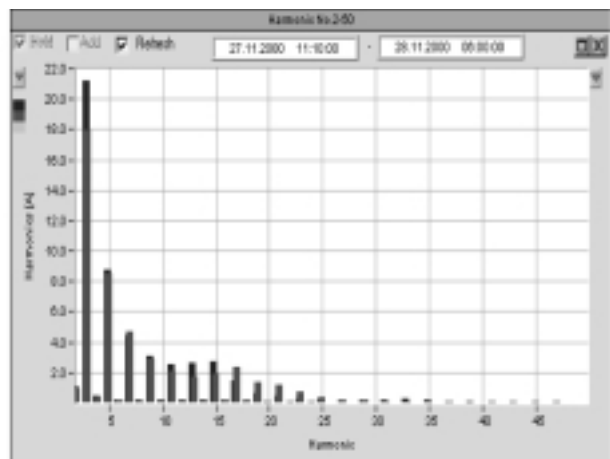
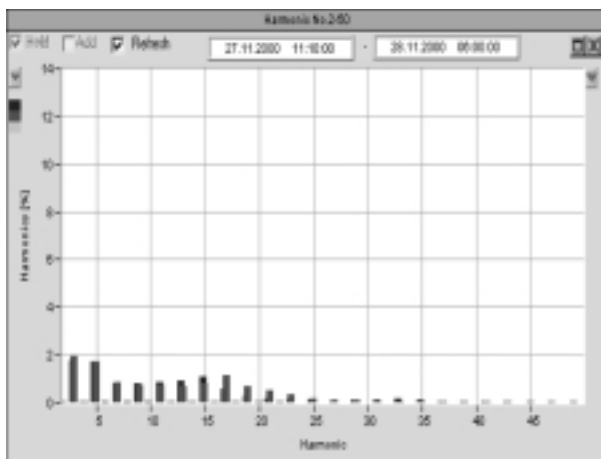
Obr. 8. Priebeh účinníka základnej harmonickej v oboch meracích miestach
Fig. 8. Power factor of fundamental harmonic in both points of measurement vs time



Obr. 9. Priebeh faktoru výkonu v oboch meracích miestach
Fig. 9. Power factor in both points of measurement vs time



Obr. 10. Priebehy THD v oboch meracích miestach pre napätie a prúd
Fig. 10. Voltage and current THD in both points of measurement vs time



Obr. 11. Harmonické napätia a prúdu v oboch meracích miestach
Fig. 11. Voltage and current harmonics in both points of measurement vs time

a prúd (obr. 10). Na obr. 11 sú výsledky harmonickej analýzy napätia a prúdu v oboch meracích miestach.

Harmonické prúdy na obr. 11 sú zobrazené v ampéroch a harmonické napätia v súlade s normou [4] v percentách zo základnej harmonickej napätia. Obsah harmonickej zložiek charakterizuje činiteľ celkového harmonickej skreslenia THD, uvedený na obr. 10. Udáva mieru skreslenia časového priebehu príslušnej neharmonickými veličinami.

$$THD_U = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} u_n^2} \cdot 100 (\%), \quad \text{kde} \quad u_n = \frac{U_n}{U_1} \quad (17)$$

Analogický vzťah platí aj pre THDI.

Výsledky merania potvrdili teoretický predpoklad, že menič napájajúci trakčné motory je zdrojom harmonickej zložiek prúdu všetkých nepárnych rádov, ktorých veľkosť je približne nepriamo úmerná rádu harmonickej. Harmonické prúdy sa prenášajú trakčným vedením a sú pretransformované do nadradenej sústavy cez

10). The results of harmonic analysis of voltage and current in both points of measurement are in Fig. 11.

Current harmonics in Fig. 11 are in amperes and voltage harmonic in per-cent values of fundamental voltage harmonic according to the standard [4]. Content of harmonic components describes total harmonic distortion factor (THD) (Fig. 10). It informs about the rate of distortion of waveshape of given non-harmonic quantity.

$$THD_U = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} u_n^2} \cdot 100 (\%), \quad \text{where} \quad u_n = \frac{U_n}{U_1} \quad (17)$$

A similar formula is also valid for THDI.

Measurement results verified theoretical assumption that a converter for traction motors feeding is the source of current harmonics of all odd orders, whose magnitudes are approximately proportional to the inverse values of harmonic order. Current harmonics are propagating along a traction overhead line and are

trakčný transformátor. V dôsledku prenosu prúdových harmonických po impedanciách napájacej sústavy dochádza k vzniku zodpovedajúcich napätových harmonických. Zvýšenie 15. a 17. napätovej harmonickej je dôsledkom paralelnej rezonancie spôsobenej R, L a C prvkami napájacej sústavy.

Kompatibilné úrovne koeficienta celkového harmonického skreslenia THD_I pre prúd norma neudáva. Kompatibilná úroveň THD_U pre napätie vo vn sieti je 8 %. Hodnoty THD_U na obr. 10 sa pohybujú v rozpätí 2 až 7 %. V sústave 110 kV je hodnota THD_U ešte nižšia, pretože skratový výkon sústavy je dostatočne veľký. V SR platí v súčasnosti norma STN EN 50160 [5], ktorá udáva medzné hodnoty harmonických napätia pre siete nn a vn. Ohraničenie prúdových harmonických zložiek pre napätové hladiny va a vvn zatiaľ nie je obsahom žiadnej normy, ani medzinárodnej.

9. Závěry, perspektívy

Striedavá elektrická trakcia výrazne zhoršuje kvalitu dodávanej elektrickej energie a preto sa stáva stredobodom záujmu energetiky. V snahe zabrániť penalizácii už boli prijaté niektoré riešenia. Prvá filtračno-kompenzačná stanica (FKS) v trakčnej transformovni Bratislava – Vinohrady plní svoju úlohu a kompenzuje účinník striedavej trakcie na neutrálny, t. j. na hodnotu 0,95 a filtruje 3. a 5. harmonickú prúdu s požadovanou účinnosťou. Ušetrí ŽSR 0,5 mil. Sk mesačne. Návratnosť FKS je cca 2,5 roka.

Ďalšie kvalitatívne parametre elektrickej energie ako faktor výkonu, nesymetria 3-fázovej sústavy a flicker efekt, ktorých zhoršenie spôsobuje striedavá elektrická trakcia, sú zatiaľ len sledované a nie penalizované, a preto neboli prijaté konkrétne riešenia pre ich odstránenie.

Univerzálnejším zariadením pre odstránenie vymenovaných nepriaznivých vplyvov sú výkonové aktívne filtre. Sú to statické polovodičové zariadenia – meniče, ktoré aktívnym spínaním na základe kontinuálneho merania priebehu prúdu odoberaného záťažou a napätia v priebehu jednej periódy vygenerujú kompenzačný prúd, čím vlastne odfiltrujú vyššie harmonické a aj fázový posun základnej harmonickej prúdu záťaže. Ich najväčšou výhodou je, že môžu vylepšiť prúd, napätie, alebo oboje súčasne.

Aktívne filtre môžu pracovať v obvodoch jednosmerného i striedavého prúdu. Podľa systémovej konfigurácie môžu byť aktívne filtre paralelné a sériové. Môžu sa spájať s pasívnymi filtrami, čím vznikajú zmiešané (hybridné) filtre. Základnou úlohou hybridných typov filtrov je znížiť počiatočné výdavky a zvýšiť efektívnosť. Paralelný pasívny filter sa skladá z jedného alebo viacerých laditeľných LC filtrov alebo širokopásmového filtra.

Ako výkonové obvody sú používané napätové ŠIM – striedače s IGBT modulmi. Ich výkonový rozsah je 50 až 500 kV.A. Taktiež boli, aj sú používané, GTO tyristory pre kompenzáciu výkonov 5 až 50 MV.A.

transformed to UHV network via traction transformer. As a result of current harmonics propagation, voltage harmonics of corresponding orders are originated at the electric network impedances. Increased magnitudes of voltage harmonics of the 15th and 17th orders are caused by parallel resonance due to R, L and C elements of supply system.

Compatible levels of THD_I factor are not stated in standards for current. Compatible level of THD_U factor is 8 % for voltages in HV networks. Values of THD_U in Fig. 10 are within the range of 2 - 7 %. The actual values of THD_U in UHV networks are even lower, as the short circuit power of the system is big enough. STN EN 50160 [5] is the valid standard, which assigns the limits for voltage harmonics in LV and HV networks. Current harmonics' limits for HV and UHV levels are not yet stated in any existing Slovak or international standard.

9. Conclusions and future outlook

An AC electric traction substantially deteriorates the quality of supplied electricity and becomes a crucial point of power distributing companies. Operators of electric railways have already introduced some measures to keep themselves clear of possible financial penalties. The first in Slovakia filtering and compensating substation (FCS) is in operation in a traction substation in Bratislava – Vinohrady. It compensates power factor of AC electric traction to the value of 0.95 and filters the 3rd and 5th current harmonics with required efficiency. It saves 0.5 mil monthly. SKK for ŽSR and its return of investments is approximately 2.5 years.

Other electricity quality parameters, whose deterioration is caused by electric traction as power factor, voltage unbalance of 3-phase system and flicker, are now only monitored but not fined by penalties. The appropriate measures for their limitation were not yet adopted.

The power active filter (PAF) is a more versatile facility for the mentioned unfavourable impact elimination. PAFs are the semiconductor devices – inverters that generate compensating current during the time of one period to filter current harmonic components and compensate power factor of fundamental harmonic of load by active switching. Compensating current generation is based on the continuous measurement of instantaneous values of load current and voltage. Their considerable advantage is the possibility to improve current, voltage or both.

PAFs can be used both in DC and AC circuits. According to their configuration the PAFs are either parallel or serial. PAFs can also be connected with passive filters to create hybrid filters. The primary role of hybrid filters is to decrease the initial expenditures and increase effectiveness. A parallel passive filter can be made out of one or more adjustable LC filters, or a broadband filter can be used.

Voltage PWM inverters with IGBT modules are used for power circuits of PAFs. The power range of these PAFs is 50 – 500 kV.A. Also GTO thyristors are used for PAFs dedicated for compensating power 5 – 50 MV.A.

Princíp činnosti meniča jednofázového výkonového aktívneho filtra v ustálenom stave ako aj možnosti realizácie dynamického výkonového aktívneho filtra boli bližšie popísané v [3].

Principles of an inverter in single-phase PAF in a steady state as well as possible implementation of dynamic power active filter were described in [3] in more detail.

Literatúra - References

- [1] OTČENÁŠOVÁ, A., TABAČEK, R.: *Methodology of Calculation of Current Harmonics in Traction Overhead Lines Propagation*, Works and Studies of VŠDS Žilina, Electro Series, Vol. 20, Žilina 1996, pp. 115-124
- [2] ALTUS, J., NOVÁK, M., OTČENÁŠOVÁ, A., POKORNÝ, M.: *Analysis of AC Traction Influence upon the Electric Network*, Proceedings of MET '99 - 4th International Conference "Drives and Supply Systems for Modern Electric Traction ...", Warsaw 1999, pp. 30-35
- [3] DOBRUCKÝ, B., OTČENÁŠOVÁ, A., POKORNÝ, M., TABAČEK, R.: *The New Possibilities of Dynamic Compensation and Regeneration of Energy in Electric Traction*, Communications - Scientific Letters of the University of Žilina, No. 1/99, pp 5-12
- [4] IEC 1000-2-4 *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2: Environment - Section 4: Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances*, 1994
- [5] STN EN 50160 *Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Systems*, 1998
- [6] AKAGI, H.: *New Trends in Active Filters*, Proceeding of EPE '95 Conference, Sevilla 1995, pp. 0.017-0.026
- [7] RÁČEK, V., DOBRUCKÝ, B., VITTEK, J., POKORNÝ, M.: *Time Sub-Optimal Analysis and Control of Fast Three-Phase Active Filter Acting in One Sixth of Period*, Proceedings of APEC '98, Anaheim 1998, pp. 979-985
- [8] SMOLA, A.: *Compact Fluorescent Lamps*, EE - A Technical Journal for Electrical and Power Engineering, No. 3/1995, pp. 30-34