

NOVÉ TRENDY V DYNAMICKEJ KOMPENZÁCII A REKUPERÁCII ENERGIE V ELEKTRICKEJ TRAKCII

THE NEW POSSIBILITIES OF DYNAMIC COMPENSATION AND REGENERATION OF ENERGY IN ELECTRIC TRACTION

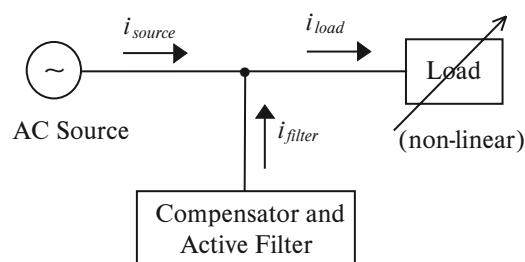
Článok uvádza dynamickú kompenzáciu, filtráciu harmonických zložiek a rekuperáciu symetrických neharmonických/nelineárnych záťaží elektrizačnej sústavy. Je tu prezentovaná nová originálna myšlienka použitia Clarkeovej ortogonálnej transformácie na vytvorenie stavového vektora skúmaných veličín a ich rozkladu na reálnu a imaginárnu časť. Vďaka šesťstranovej symetrii stavového vektora v komplexnej oblasti vzorkovacie a riadiace obvody filtra zvládnu aj rýchle dynamické zmeny záťaže. **Analýza a výpočet činného výkonu/prúdu záťaže môžu byť dokončené v priebehu jednej štvrtiny periódy pre jednofázovú sústavu, alebo jednej šiestiny periódy pre trojfázovú sústavu** (z dát získaných v predchádzajúcej štvrtine alebo šiestine). Odozva kompenzátora na aktuálny stav záťaže je tak zabezpečená v najkratšom možnom čase.

1. Úvod

Prúd záťaží, ktoré (ak uvažujeme ich nelineárny charakter) odoberajú jalový a deformačný výkon, je zložený zo základnej zložky s jednotkovým účinníkom voči napätiu siete a harmonických zložiek, ktoré tvoria jalový a deformačný kompenzačný prúd.

Na elimináciu týchto javov je potrebné kompenzovať účinník a filtrovať harmonické zložky, najlepšie v mieste ich vzniku - obr. 1. To môže robiť kompenzátor a aktívny filter, dokonca aj v prípadoch, kedy sa zataženie rýchlo mení.

Hlavnou úlohou kompenzátora alebo aktívneho i_{filter} , obr. 2, je generovanie takého doplnkového kompenzačného prúdu i_{filter} , ktorý po sčítaní s neharmonickým a fázovo posunutým prúdom záťaže i_{load} zabezpečí, že z napájacej siete bude odoberaný iba činný výkon (činný a sínusový prúd i_{source}):



Obr. 1. Bloková schéma paralelnej kompenzácie a filtrácie
Fig. 1 Block scheme of parallel compensation and filtering

The paper presents dynamic compensation, harmonics filtration and regeneration of symmetrical non-harmonic / non-linear loads in energetic systems. The new original thought uses Clarke's orthogonal transform for creation of state-space vector of investigated quantities and its decomposition into real- and imaginary components. The acquisition and control circuitry of the filter can then handle fast dynamic changes of the load, due to six-side symmetry of state-space vector in the complex domain. **The analysis and computation of the load's active power / current should be completed within one fourth of the period for single-phase system and one sixth of the period for three-phase system** (from acquired data of previous fourth or sixth periods). The compensator response to the actual state of the load then can be as fast as possible.

1. Introduction

The current of the load, which needs (considering its non-linear nature) to be supplied by reactive and distortion powers will be composed of a fundamental component with a unity power factor against the network supply voltage and harmonic components, constituted by reactive and distorted compensating currents.

To eliminate this phenomena, it is necessary to compensate the power factor and filter higher harmonic better than just in the point of their origin, Fig. 1. Compensator and active filters can do this, even in the case of rapidly changing loads.

The main task of such a compensator or active i_{filter} , Fig. 2, is the generation of complementary compensating current i_{filter} such

that after its addition with non-harmonic and phase shifted load current i_{load} , the only active power (active and sinusoidal current i_{source}) will be taken off the supplying network:

* Prof. Ing. Branislav Dobrucký, PhD., Ing. Alena Otčenášová, PhD., Doc. Ing. Michal Pokorný, PhD., Doc. Ing. Rastislav Tabaček, PhD.,
Department of Electric Traction and Energetics, Faculty of Electrical Engineering, University of Žilina,
V. diel ND 220, SK-010 26 Žilina, Slovak Republic, Phone +421-89-646 2188, Fax +421-89-549 63, E-mail dobrucky@kete.utc.sk

$$i_{load}(t) = i_{filter}(t) + i_{source}(t) \quad (1)$$

Výpočet tohto kompenzačného prúdu je najdôležitejšou činnosťou riadiacich obvodov kompenzátora. Výpočty sa môžu uskutočniť dvoma rôznymi spôsobmi:

- Určením (meraním, alebo iným spôsobom) činného výkonu záťaže:

$$P_{AV} = \frac{1}{T} \int (i_{load} \cdot v_{source}) dt \quad (2)$$

kde v_{source} je napätie zdroja. Amplitúda základnej zložky činného prúdu:

$$I_{1source} = \frac{2 P_{AV}}{V_{source}} \quad (3)$$

- Určením základnej harmonickej zložky prúdu záťaže harmonickou analýzou:

$$i_{load} = \frac{a_o}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(\omega_n \cdot t)) + \sum_{n=1}^{\infty} (b_n \sin(\omega_n \cdot t)) \quad (4)$$

kde a_n a b_n sú koeficienty Fourierovho rozvoja a a_o je hodnota jednosmernej zložky analyzovaného priebehu. Amplitúda a fáza základnej zložky prúdu potom sú:

$$I_{1load} = \sqrt{a_1^2 + b_1^2};$$

$$\varphi_1 = \arctg\left(\frac{b_1}{a_1}\right) \quad (5)$$

Amplitúda prúdu zdroja, ktorý má rovnakú fázu ako napätie zdroja potom je:

$$I_{1source} = I_{1load} \cdot \cos\varphi_1 \quad (6)$$

2. Kompenzácia a filtrácia v ortogonálnej transformácii

V Clarkeovej transformácii bude mať určitá veličina tvar:

$$x^*(t) = \frac{2}{3} \left[x_a(t) + a x_b(t) + a^2 x_c(t) \right] = x_\alpha + j x_\beta \quad (7)$$

kde $x^*(t)$ je stavový vektor danej veličiny, x_a, b, c sú fázové hodnoty a

$$a = e^{j \frac{2}{3} \cdot \pi}; j = \sqrt{-1}; x_\alpha = \frac{1}{3} (2 x_a - x_b - x_c);$$

$$x_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} (x_b - x_c) \quad (8)$$

V trojvodičovom symetrickom systéme: $x_\alpha = x_a$.

$$i_{load}(t) = i_{filter}(t) + i_{source}(t) \quad (1)$$

The calculation of this compensating current is the most important activity of the compensator's control circuit. The calculations can be carried out in two different ways:

- By determination (by measurement or in another way) of the load's active power:

$$P_{AV} = \frac{1}{T} \int (i_{load} \cdot v_{source}) dt \quad (2)$$

where v_{source} is the source voltage. Amplitude of the active current fundamental component:

$$I_{1source} = \frac{2 P_{AV}}{V_{source}} \quad (3)$$

- By determination of the load current's fundamental component by harmonic analysis:

$$i_{load} = \frac{a_o}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(\omega_n \cdot t)) + \sum_{n=1}^{\infty} (b_n \sin(\omega_n \cdot t)) \quad (4)$$

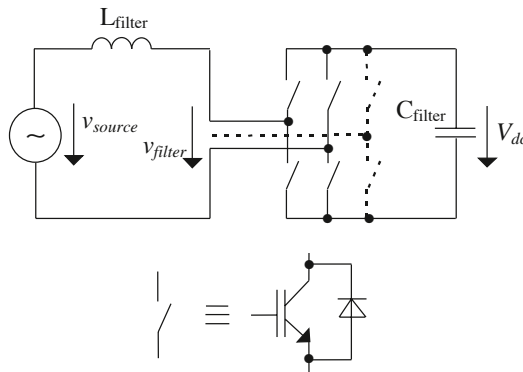
where a_n and b_n are the coefficients of Fourier series and a_o is the value of DC component of analysed waveform. Amplitude and phase angle of the current's fundamental component are then:

$$I_{1load} = \sqrt{a_1^2 + b_1^2};$$

$$\varphi_1 = \arctg\left(\frac{b_1}{a_1}\right) \quad (5)$$

The amplitude of source current, which has the same phase angle as the source voltage is then:

$$I_{1source} = I_{1load} \cdot \cos\varphi_1 \quad (6)$$



Obr. 2. Základné zapojenie 1(3)-fázového kompenzátora

Fig. 2 Basic connection of 1(3)-phase compensator

2. Compensation and Filtering under Orthogonal Transform

Any quantity under Clarke transform will have the following form:

where $x^*(t)$ is the state-space vector of any quantity, x_a, b, c are phase values and

$$a = e^{j \frac{2}{3} \cdot \pi}; j = \sqrt{-1}; x_\alpha = \frac{1}{3} (2 x_a - x_b - x_c);$$

$$x_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} (x_b - x_c) \quad (8)$$

In 3-wire symmetrical system: $x_\alpha = x_a$.

Pri výpočte P_{AV} založenom na šesťstranovej symetrii trajektórie $x^*(t)$ [3], [8] v Gaussovej rovine pre neharmonické veličiny, sa môže integrovať v ľubovoľnom časovom intervale dĺžky $T/6$ s rovnakým výsledkom ako v časovej oblasti.

V prípade neharmonických veličín v a i , môžeme dostať nasledovné hodnoty určené pre časový interval od $-\pi/6$ do $\pi/6$:

$$P_{AV} = \frac{3}{2} \cdot \frac{3}{\pi} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} (v_{\alpha} \cdot i_{\alpha} + v_{\beta} \cdot i_{\beta}) d\omega t \quad (9)$$

Uvedený integrál bol vypočítaný podľa predpokladov uvedených v autorovom článku [10] a podrobný výpočet je uvedený v prílohe 1 v [11].

Podobným spôsobom sa určí komplexný Fourierov koeficient pre prúd záťaže:

$$C_1 = \frac{3}{2} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \left\{ \left[i_{\alpha} \cos(\omega t) + i_{\beta} \sin(\omega t) \right] + j \left[i_{\beta} \cos(\omega t) - i_{\alpha} \sin(\omega t) \right] \right\} d\omega t \quad (10)$$

Podrobný výpočet tohto vzťahu je uvedený v prílohe ďalšieho autorovho článku [8].

V jednofázovom systéme môže byť použitý nasledovný postup: Jeho základom je vyjadrenie symbolického vektora a substitúcia sínusovej funkcie:

$$\cos(\omega t) \rightarrow \exp(j\omega t) = \cos(\omega t) + j \cdot \sin(\omega t) \quad (11)$$

Takto bude prúd odporovo-induktívnej záťaže v ustálenom stave:

$$i^*(t) = V \cdot \exp(j\omega t) / |Z| \cdot \exp(j\varphi) = I [\cos(\omega t - \varphi) + j \cdot \sin(\omega t - \varphi)] \quad (12)$$

kde $Z = R + j\omega L$ a $\varphi = \arctg(\omega L/R)$ a výsledok je reálna časť $i^*(t)$.

Ak máme jednofázový systém určený

$$v(t) = V \cos(\omega t); i(t) = I \cos(\omega t - \varphi), \quad (13)$$

po doplnení fiktívnej imaginárnej fázy, ktorá je definovaná

$$v_f(t) = V_f \sin(\omega t); i_f(t) = I_f \sin(\omega t - \varphi) \quad (14)$$

dostaneme ortogonálny súradnicový systém, kde

$$v_{\alpha} = v(t) \text{ a } v_{\beta} = v_f(t) \quad (15)$$

Vo všeobecnosti sa fiktívna imaginárna fáza môže vytvoriť posunutím pôvodnej jednofázovej veličiny doprava s fázovým posunom rovným $-\pi/2$. To vyplýva zo štvorstranovej symetrie trajektórie vektorovej veličiny v Gaussovej rovine [5]. Pozri obr. 3. Pre veličinu so štvorstranou symetriou musí platiť nasledujúca rovnica:

Based on the 6-side symmetry of trajectory of $x^*(t)$ [3], [8] in the Gauss plane for non-harmonic quantities, computing P_{AV} , one can integrate in an arbitrary time interval the length of $T/6$ with the same result as in the time domain.

In the case of non-harmonic quantities v and i , the following values can be derived for time interval from $-\pi/6$ to $\pi/6$:

$$P_{AV} = \frac{3}{2} \cdot \frac{3}{\pi} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} (v_{\alpha} \cdot i_{\alpha} + v_{\beta} \cdot i_{\beta}) d\omega t \quad (9)$$

The above integral was calculated in accordance with the considerations mentioned in the author's paper [10] and the detailed computation is in Appendix 1 of [11].

We obtain in a similar way the complex Fourier coefficient of the load's current:

The detailed derivation of the above equation is in the Appendix of another author's paper [8].

In the single phase system the following approach can be used: The basis for this approach can be a symbolic vector expression and substitution of harmonic function as

$$\cos(\omega t) \rightarrow \exp(j\omega t) = \cos(\omega t) + j \cdot \sin(\omega t) \quad (11)$$

thus for resistant-inductive load current in steady-state

$$i^*(t) = V \cdot \exp(j\omega t) / |Z| \cdot \exp(j\varphi) = I [\cos(\omega t - \varphi) + j \cdot \sin(\omega t - \varphi)] \quad (12)$$

where $Z = R + j\omega L$ and $\varphi = \arctg(\omega L/R)$ and the result is the real part of $i^*(t)$.

So, let's define a single-phase system as

$$v(t) = V \cos(\omega t); i(t) = I \cos(\omega t - \varphi), \quad (13)$$

After complementing by fictitious imaginary phase defined as

$$v_f(t) = V_f \sin(\omega t); i_f(t) = I_f \sin(\omega t - \varphi) \quad (14)$$

we obtain an orthogonal co-ordinate system whereas

$$v_{\alpha} = v(t) \text{ and } v_{\beta} = v_f(t) \quad (15)$$

Generally, the fictitious imaginary phase can be created by shifting ordinary single-phase quantity to the right with the phase shift equal to $-\pi/2$. It follows out from the 4-side symmetry of vector quantity trajectory in Gauss plane [5], see Fig. 3. The following equation must be valid for quantity with 4-side symmetry

$$x^*(t) = x^*(t - T/4) \cdot \exp(j \cdot \pi/2) \quad (16)$$

a tiež

$$x(t) = -x(t - T/2) \quad (16a)$$

$$\text{a } x_i(t) = x(t - T/4)$$

A záverom môže byť uvedená všeobecná transformačná rovnica pre jednofázový systém:

$$x^*(t) = K [x(t) + \exp(j \cdot \pi/2) x_i(t)] \quad (17)$$

kde K je multiplikatívna konštanta (pre jednofázový systém je rovná 1) a

$$x_\alpha = x(t) \quad \text{a} \quad x_\beta = x_i(t) \quad (18a,b)$$

Fourierova analýza vyšetrovanej veličiny sa potom môže vykonať v 1/4 časovej periódy, ako je ukázané na obr. 3. Komplexné Fourierove koeficienty sú definované

$$C_1^* = \frac{4}{T} \int_0^{T/4} x^*(t) \cdot \exp(-j\omega t) dt \quad (19)$$

Predpokladajme súbor numerických dát pre $v(t)$ a $v_i(t)$ z [5], pozri obr. 4. Výsledok dostaneme aplikáciou numerického riešenia integrálov (9) substitúciou

$$\int_0^{T/4} x^*(t) \cdot \exp(-j\omega t) dt \approx \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-1} [f(k \cdot t)] + (f(0) + f(N))/2 \quad (20)$$

kde N je počet vzoriek, k je poradie vzorky. Výsledná trajektória základnej zložky, daná C_1 , φ_1 z (19), je na obr. 3 (bodkovaná čiara).

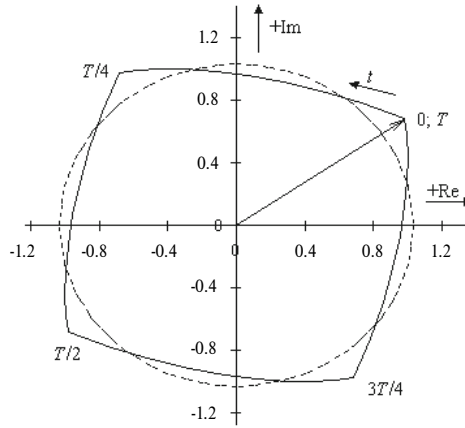
Určenie činného a jalového výkonu. Uvažujme teraz pre jednoduchosť sínusové priebehy fázového napätia a prúdu

$$v(t) = V \cos(\omega t) \quad (21a,b)$$

$$i(t) = I \cos(\omega t - \varphi)$$

Použitím časovo sub-optimálnej analýzy v transformovaných ortogonálnych súradniciach pre štvorstranovú symetriu sa stredná hodnota činného výkonu P_{AV} v originálnej (skutočnej) fáze určí:

$$P_{AV} = \frac{P_{\alpha\beta AV}}{2} = \frac{2}{T} \int_0^{T/4} [v_\alpha \cdot i_\alpha + v_\beta \cdot i_\beta] dt \quad (22)$$



Obr. 3. Trajektória výstupného napätia jednofázového prúdového meniča v komplexnej Gaussovej rovine [5]
Fig. 3 Trajectory of output voltage of single-phase current inverter in complex Gauss plane [5]

$$x^*(t) = x^*(t - T/4) \cdot \exp(j \cdot \pi/2) \quad (16)$$

and also

$$x(t) = -x(t - T/2) \quad (16a)$$

$$\text{and } x_i(t) = x(t - T/4)$$

Finally, the general transform equation can be introduced for single-phase system

$$x^*(t) = K [x(t) + \exp(j \cdot \pi/2) x_i(t)] \quad (17)$$

where K is multiplicative constant (equal to 1 for single-phase system) and

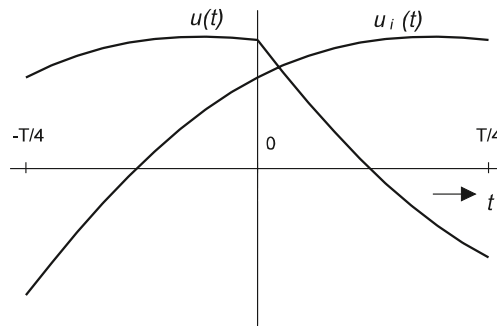
$$x_\alpha = x(t) \quad \text{and} \quad x_\beta = x_i(t) \quad (18a,b)$$

Fourier analysis of investigated quantity is then possible to do in 1/4 of time period as seen in Fig. 3. The complex Fourier coefficients are defined as

$$C_1^* = \frac{4}{T} \int_0^{T/4} x^*(t) \cdot \exp(-j\omega t) dt \quad (19)$$

Let's assume a set of numerical data for $v(t)$ and $v_i(t)$ from [5], see Fig. 4. The result can be gained by application of the numerical solution of the integrals (9) by substitution

where N is the number of samples, k is the order of the sample. The resulting trajectory of fundamental harmonic given by C_1 , φ_1 from (19), can be seen in Fig. 3 (dotted line).



Obr. 4. Časové priebehy $v(t)$ a $v_i(t)$
Fig. 4 Time waveforms of $v(t)$ and $v_i(t)$

Active and Reactive Power Determination. Assume now, for simplicity, harmonic waveforms of phase-voltage and phase-current

$$v(t) = V \cos(\omega t) \quad (21a,b)$$

$$i(t) = I \cos(\omega t - \varphi)$$

Using the time-sub-optimal analysis in transformed orthogonal coordinates for 4-side symmetry an average value of active power P_{AV} of an original (real) phase

$$P_{AV} = \frac{P_{\alpha\beta AV}}{2} = \frac{2}{T} \int_0^{T/4} [v_\alpha \cdot i_\alpha + v_\beta \cdot i_\beta] dt \quad (22)$$

Stredné hodnoty činného výkonu v imaginárnej fáze P_{iAV} a jalových výkonov oboch fáz, originálnej Q_{AV} a imaginárnej Q_{iAV} sa určia podobným spôsobom.

Metóda okamžitého jalového výkonu je aplikovaná v [6] na trojfázový systém, ale vyššie uvedená teória ju dovoľuje použiť aj na jednofázový systém:

$$\begin{aligned} p_{\alpha\beta} &= v_{\alpha} \cdot i_{\alpha} + v_{\beta} \cdot i_{\beta} \\ q_{\alpha\beta} &= v_{\alpha} \cdot i_{\beta} - v_{\beta} \cdot i_{\alpha} \end{aligned} \quad (23a,b)$$

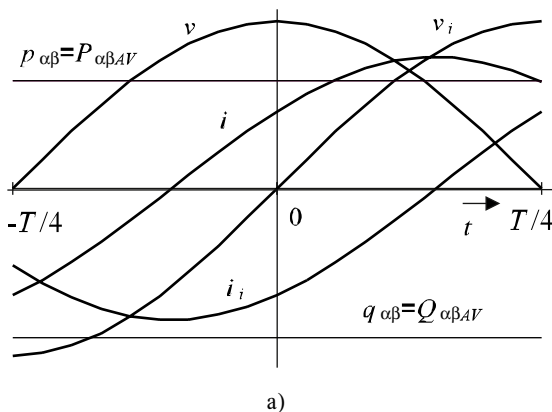
kde $p_{\alpha\beta}$ a $q_{\alpha\beta}$ sú okamžité činné a jalové výkony oboch fáz v ortogonálnych súradniciach. Pre sínusové priebehy sú konštantné a účinník sa môže vypočítať z fázového posunu, obr. 5:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{q_{\alpha\beta}}{p_{\alpha\beta}}\right) \quad (24)$$

Dôležité je, že $p_{\alpha\beta}$, $q_{\alpha\beta}$ a φ sú v tomto sínusovom prípade určené okamžite, čo je zásadným prínosom uvádzanej metódy.

V prípade neharmonických záťaží hodnoty okamžitých činných a jalových výkonov nie sú konštantné vplyvom existencie deformačného výkonu, zapríčineného harmonickými zložkami. Potom okamžité činné a jalové výkony sú:

$$p_{\alpha\beta} = P_{\alpha\beta AV} + p_{\alpha\beta AC} \quad \text{a} \quad q_{\alpha\beta} = Q_{\alpha\beta AV} + q_{\alpha\beta AC} \quad (25a,b)$$



Average values of active power of imaginary phase P_{iAV} and reactive powers of both original Q_{AV} and imaginary Q_{iAV} phases can be determined similarly.

Utilisation of the instantaneous reactive power method is used in [6] for three-phase systems, and the above theory allows its use for single-phase systems as well

$$\begin{aligned} p_{\alpha\beta} &= v_{\alpha} \cdot i_{\alpha} + v_{\beta} \cdot i_{\beta} \\ q_{\alpha\beta} &= v_{\alpha} \cdot i_{\beta} - v_{\beta} \cdot i_{\alpha} \end{aligned} \quad (23a,b)$$

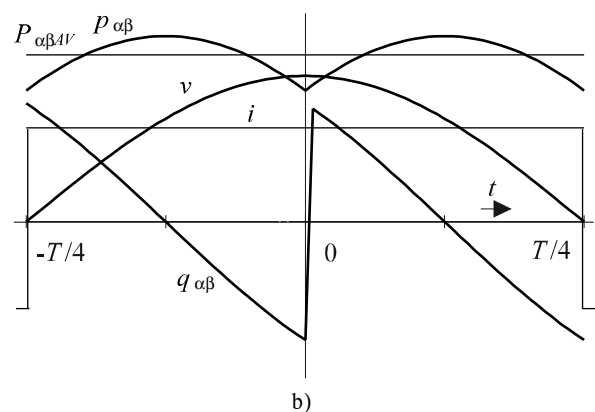
where $p_{\alpha\beta}$ and $q_{\alpha\beta}$ are the instantaneous active and reactive powers of both phases in orthogonal coordinates. For sinusoidal waveforms they are equal to constants and the power factor can be determined by phase shift, Fig. 5

$$\varphi = \arctg\left(\frac{q_{\alpha\beta}}{p_{\alpha\beta}}\right) \quad (24)$$

It is important that $p_{\alpha\beta}$, $q_{\alpha\beta}$ and φ are in this sinusoidal case determined instantaneously what is the essential contribution of the introduced method.

In case of non-harmonic loads the values of instantaneous active and reactive powers are not constant, due to the existence of deformation power caused by harmonic components. Then the instantaneous active and reactive powers are

$$p_{\alpha\beta} = P_{\alpha\beta AV} + p_{\alpha\beta AC} \quad \text{and} \quad q_{\alpha\beta} = Q_{\alpha\beta AV} + q_{\alpha\beta AC} \quad (25a,b)$$



Obr. 5. Časové závislosti $p_{\alpha\beta}$, $q_{\alpha\beta}$ zložiek výkonu pre sínusovú (a) a neharmonickú (b) záťaž
Fig. 5 Time-dependence of instantaneous $p_{\alpha\beta}$, $q_{\alpha\beta}$ components of the power for sinusoidal (a) and non-harmonic (b) loads

V aktívnych filtroch sú referenčné hodnoty kompenzačných prúdov založené na znalosti vyššie odvodených vzťahov pre činné a jalové výkony, pričom stredná hodnota činného výkonu musí byť eliminovaná. V trojfázových aktívnych filtroch sa striedavé zložky výkonov obvykle získajú pomocou dolnopriepustných filtrov, niekedy výpočtom za určitý časový interval (jedna perióda). V jednofázových aktívnych filtroch tieto metódy neboli použité, nakoľko nebola k dispozícii teória ortogonálnej transformácie pre jednofázový systém, popísaná v tomto článku. Vďaka tejto teórii je

In active filters the reference values of compensating currents are based on the knowledge of the above derived formulae for active and reactive powers, where the average value of active power must be eliminated. In three-phase active filters the AC components of powers are gained usually by low-pass filtering, sometimes by calculation through some time interval (one period). In single-phase active filters those methods were not used because of the lack of the orthogonal transform theory for the single-phase system described in this paper. Thanks to that theory it is possible to

možné počítať stredné hodnoty činného a jalového výkonu za 1/4 časovej periódy. Tieto stredné hodnoty sa môžu počítať spojito, pre každý časový okamih t , s použitím dát uložených za predchádzajúcu 1/4 periódy.

3. Možnosti rekuperácie kinetickej a potenciálnej energie vozidiel

Podobne ako pri kompenzácii a aktívnom filtrovaní je možné šetriť elektrickú energiu rekuperáciou kinetickej a potenciálnej energie trakčného vozidla pri rekuperačnom brzdení alebo udržiavaní rýchlosti pri jazde po spáde [7]. Základná schéma silových obvodov pre rekuperáciu energie je podobná ako na obr. 2. Kvôli namáhaniu vysokým napätím používajú sa dvoj alebo viacúrovňové zapojenia, obr. 6.

Zdroj energie - brzdiaci trakčný motor (motory) musí byť pripojený na jednosmerný vstup meniča. V prípade jednosmernej trakcie rekuperačný menič môže byť umiestnený v trakčnej meniarni, navyše môže byť v trojfázovom zapojení.

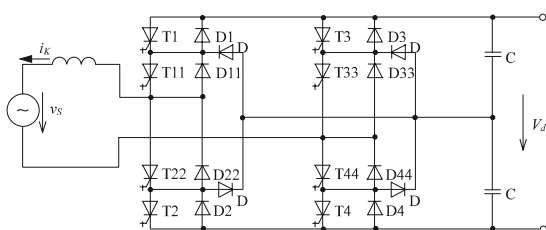
Používané polovodičové súčiastky. Obvykle, pre výkony do 1 MW, môžu byť použité IGBT tranzistory so spätnými diódami. Pre väčšie výkony (> 5 MW) a vyššie napätia (3 kV js) musia byť použité GTO tyristory alebo IGBT v dvojúrovňovom zapojení. Nakoľko spínače musia byť oboj-smerné, je použitie unipolárnych výkonových tranzistorov (MOSFET, SIT) v inverznom režime veľmi zaujímavou možnosťou.

Podrobnejší rozbor kvality rekuperácie elektrickej energie je urobený v pripravovanom článku.

4. Záver

V článku boli uvedené nové metódy dynamickej kompenzácie a rekuperácie. Navrhované riešenie má významné prínosy:

- Generuje kompenzačný prúd, ktorý zabezpečí, že prúd zo siete bude sinusový a to aj v prípade, že sieťové napätie je nesinusové.
- Počíta amplitúdu základnej zložky sieťového prúdu výpočtom činného výkonu záťaže na jednu štvrtinu/šiestinu časovej periódy s použitím Clarkeovej/Parkovej ortogonálnej transformácie.



Obr. 6. Dvojúrovňové zapojenie rekuperačného meniča (jednofázové zapojenie)

Fig. 6 Two-level connection of regenerative converter (single-phase connection)

compute the average values of active and reactive powers for 1/4 of the time period. These average values can be calculated continuously for each time instant t , using data stored for the previous 1/4 of period.

3. Possibilities of kinetic- and potential vehicle's energy regeneration

Similarly to the compensation and active filtering, it is also possible to save electric energy by the regeneration of kinetic- and potential energy of the tractive vehicle at regenerative braking and overrunning at down hill runs [7]. The basic scheme of power circuits for energy regeneration is similar to that as in Fig. 2. For high voltage stresses, two- (or more) level connections have to be used, Fig. 6.

The source of energy - braking tractive motor(s) has to be connected to the DC input of the converter. In case of DC electric traction, the regenerating converter should be situated in traction substation. It can also be used in three-phase connection.

The power semiconductor devices being used at present. Usually, for power up to 1 MW, IGBT transistors with reverse diodes can be used. For high performances (> 5 MW) and high

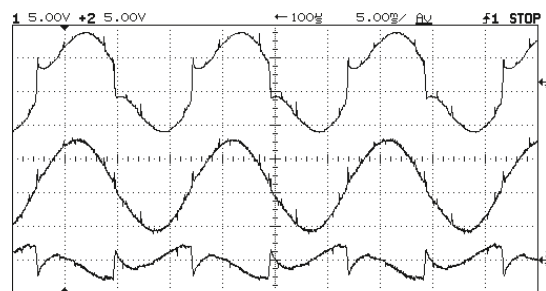
voltage (3 kVdc) GTO thyristors or IGBTs in two level connection must be used. As the switches must be bi-directional, the use of unipolar power transistors (MOSFETs, SITs) in reverse mode of operation is a very interesting possibility.

The detailed analysis of regeneration's quality will be accomplished in the paper that is being prepared.

4. Conclusions

The new methods of dynamic compensation and regeneration are presented in the paper. The proposed solution has the following important features:

- It generates compensation current providing the main current to be sinewave even at non-sinusoidal main voltage.
- It computes the magnitude of the fundamental component of net current by computing the load's active power in one fourth/sixth of time period using two-axis Clarke/Park orthogonal transform.



Obr. 7. Časové priebehy záťažového, sieťového a kompenzačného prúdu
Fig. 7 Time waveforms of load-, source and compensation currents

Výhodným riešením by mohla byť kombinácia tu uvedeného „štvrtinového/šestinového“ výpočtu a technická implementácia výpočtu základnej zložky použitím analógových integrátorov na riešenie rovníc (9) alebo (10) v [8] (iba pre jednofázové systémy). V súčasnosti sa uskutočňuje výskum jednofázových a trojfázových aktívnych filtrov riadených v otvorenej slučke pre malé výkony a výsledky uvádzané [11], obr. 7, treba chápať ako predbežné. Výsledné experimenty s riadením aktívnych filtrov v uzavretej slučke budú pripravené pre publikáciu v najbližšom čase.

Podakovanie

Táto práca bola podporovaná Ministerstvom školstva a vedy SR v rámci grantových projektov č. 1/3234/96 a č. 1/4243/97.

5. Literatúra

- [1] JOU, H. L., WU, J. C., CHU, H. Y.: *New Single Phase Active Power Filter*. IEE Proceedings on Electric Power Application, Vol. 141, No. 3, May 1994, s. 129-134
- [2] SCHWARTZENBERGER, J. W., FISCHL, R., MEHTA, H.: *Experimental Validation Study of an EMTP Design of a VAR Compensator Controlled by Instantaneous Reactive Current*. In: Proceedings of the EDPE'92 Conference, Vol. 1, Kosice (S.R.), September 1992, s. 199-203
- [3] SOLIK, I., VITTEK, J., DOBRUCKÝ, B.: *Time-optimal Analysis of Characteristic Values of Periodical Wave-forms of m-Phase Systems in Complex Domain*, Modelling, Simulation & Control Journal, Vol. A 28, AMSE Press, Tassin (France), s. 49-64, No. 3, 1990
- [4] DOBRUCKÝ, B., VITTEK, J.: *Connection for the Fast Harmonic Analysis of the Symmetrical Three-Phase System* (in Slovak), CS Patent Pending No. 264980, Prague (Cz.R.), December 1989
- [5] DOBRUCKÝ, B.: *Analysis and Modelling of Power Semiconductor Converter in Steady and Transient States* (in Slovak). Ph.D. Thesis, University of Zilina (SR), July 1985
- [6] BRANDSTETTER, P., BUBELA, T.: *Active Power Filter for Compensation of Symmetrical Loads* (in Czech). EE-Electroenergetics, special issue, Vol. II, November 1996, s. B-21, B-22
- [7] DOBRUCKÝ, B., DRABEK, J.: *Possibilities of energy saving by means of regenerative braking in the High Tatras railways* (in German). Proceedings of 4th EIPOS Symposium, University of Zilina, S.R., September 1996, s. 137-141
- [8] RAČEK, 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*. In: Proceedings of APEC '98 Conference, Anaheim (USA, CA), February 1998, Vol. 2, s. 979-985
- [9] KARA, A., AMHOF, D., DAEHLER, P., GRUENING, H.: *Power Quality Improvement with a Dynamical Voltage Restorer*. In: Proceedings of APEC '98 Conference, Anaheim (USA, CA), February 1998, Vol. 2, s. 986-993

An advantageous solution should be the combination of "one fourth/sixth" calculations and the technical implementation of the first harmonic calculation by the use of analogue integrators for solution of equations (9) or (10) in [8] (for single-phase only). The research in single- and three-phase versions of active filter control in open-loop mode is now in progress in the low-power scale, so the presented results [11], Fig. 7, can be understood as preliminary. We would like to publish the final results of active filter control in closed-loop mode in the near future.

Acknowledgement

This work was supported by the Slovak Department of Education & Science under the grant projects No. 1/3234/96 and No. 1/4243/97.

5. References

- [1] JOU, H. L., WU, J. C., CHU, H. Y.: *New Single Phase Active Power Filter*. IEE Proceedings on Electric Power Application, Vol. 141, No. 3, May 1994, pp. 129-134
- [2] SCHWARTZENBERGER, J. W., FISCHL, R., MEHTA, H.: *Experimental Validation Study of an EMTP Design of a VAR Compensator Controlled by Instantaneous Reactive Current*. In: Proceedings of the EDPE'92 Conference, Vol. 1, Kosice (S.R.), September 1992, pp. 199-203
- [3] SOLIK, I., VITTEK, J., DOBRUCKÝ, B.: *Time-optimal Analysis of Characteristic Values of Periodical Wave-forms of m-Phase Systems in Complex Domain*, Modelling, Simulation & Control Journal, Vol. A 28, AMSE Press, Tassin (France), pp. 49-64, No. 3, 1990
- [4] DOBRUCKÝ, B., VITTEK, J.: *Connection for the Fast Harmonic Analysis of the Symmetrical Three-Phase System* (in Slovak), CS Patent Pending No. 264980, Prague (Cz.R.), December 1989
- [5] DOBRUCKÝ, B.: *Analysis and Modelling of Power Semiconductor Converter in Steady and Transient States* (in Slovak). Ph.D. Thesis, University of Zilina (SR), July 1985
- [6] BRANDSTETTER, P., BUBELA, T.: *Active Power Filter for Compensation of Symmetrical Loads* (in Czech). EE-Electroenergetics, special issue, Vol. II, November 1996, pp. B-21, B-22
- [7] DOBRUCKÝ, B., DRABEK, J.: *Possibilities of energy saving by means of regenerative braking in the High Tatras railways* (in German). Proceedings of 4th EIPOS Symposium, University of Zilina, S.R., September 1996, pp. 137-141
- [8] RACEK, 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*. In: Proceedings of APEC '98 Conference, Anaheim (USA, CA), February 1998, Vol. 2, pp. 979-985
- [9] KARA, A., AMHOF, D., DAEHLER, P., GRUENING, H.: *Power Quality Improvement with a Dynamical Voltage Restorer*. In: Proceedings of APEC '98 Conference, Anaheim (USA, CA), February 1998, Vol. 2, pp. 986-993

- [10] DOBRUCKÝ, B., TABAČEK, R., OTČENÁŠOVÁ, A.: *Dynamic Compensation of Power Factor and Higher Harmonics by Active Filters* (in Slovak). In: Proceedings of Optimization of Electric Energy Consumption'98, Usti n/L (Cz.R.), April 1998, s.(in CD-ROM form)
- [11] DOBRUCKÝ, B., POKORNÝ, M.: *Dynamic Compensation of Three-Phase Symmetrical System Using Clarke Orthogonal Transform*. In: Proceeding of Energy Management'98 Conference, Dubrovnik (Croatia), May 1998, s. 100-105
- [12] ALTUS, J., DOBRUCKÝ, B.: *Prienik vykonovej elektroniky, elektrenergetiky a elektrickej trakcie v 21. storoci*. In: Proceedings of TER_SR'98 Conference, Tr. Teplice (SR), July 1998, s. 197-210
- [13] TABAČEK, R., DOBRUCKÝ, B., OTČENÁŠOVÁ, A.: *On Some New Trends in Dynamic Compensation and Regeneration of Energy in Electric Traction*. In: Proceedings of Communications on the Edge of the Millenniums Conference, Zilina (SR), September 1998, s. 45-48
- [14] DOBRUCKÝ, B., POKORNÝ, M., ROCH, M., HAVRILA, R.: *Techniques of Active Load's Current and/or Power Computing for Dynamic Compensation of Three-Phase Symmetrical System*. In: Proceedings of IEE-PEVD'98 Conference, London (UK), September 1998, s. 51-56
- [15] KŮS, V.: *Výstupní filtry měničů kmitočtu*. III. konference Energetické rušení ERU '98, Brno (CR), November '98, pp.(in CD-ROM form)
- [10] DOBRUCKY, B., TABACEK, R., OTCENASOVA, A.: *Dynamic Compensation of Power Factor and Higher Harmonics by Active Filters* (in Slovak). In: Proceedings of Optimization of Electric Energy Consumption'98, Usti n/L (Cz.R.), April 1998, pp.(in CD-ROM form)
- [11] DOBRUCKY, B., POKORNY, M.: *Dynamic Compensation of Three-Phase Symmetrical System Using Clarke Orthogonal Transform*. In: Proceeding of Energy Management'98 Conference, Dubrovnik (Croatia), May 1998, pp. 100-105
- [12] ALTUS, J., DOBRUCKY, B.: *Prienik vykonovej elektroniky, elektrenergetiky a elektrickej trakcie v 21. storoci*. In: Proceedings of TER_SR'98 Conference, Tr. Teplice (SR), July 1998, pp. 197-210
- [13] TABACEK, R., DOBRUCKY, B., OTCENASOVA, A.: *On Some New Trends in Dynamic Compensation and Regeneration of Energy in Electric Traction*. In: Proceedings of Communications on the Edge of the Millenniums Conference, Zilina (SR), September 1998, pp. 45-48
- [14] DOBRUCKY, B., POKORNY, M., ROCH, M., HAVRILA, R.: *Techniques of Active Load's Current and/or Power Computing for Dynamic Compensation of Three-Phase Symmetrical System*. In: Proceedings of IEE-PEVD'98 Conference, London (UK), September 1998, pp. 51-56
- [15] KŮS, V.: *Výstupní filtry měničů kmitočtu*. III. konference Energetické rušení ERU '98, Brno (CR), November '98, pp.(in CD-ROM form)