

Improving Power Quality in AC Supply Grids

Author

Piotr Fabijański

Keywords

power quality, UPQC, APF, THD ratio, HD ratio

Abstract

This paper describes a digital and actual model of the UPQC (Unified Power Quality Conditioner) integrated system for power quality improvement. The UPQC's design and its connection to an AC supply grid, 1-phase and 3-phase alike, provide effective compensation of unwanted interferences in the waveforms of load supply voltages and non-linear load currents. This article presents an overview of topologies and control strategies. The study of the UPQC confirmed its positive impact on the power quality. The electricity parameters were significantly improved. Total harmonic distortion in supply voltage THDu decreased six-fold to 1.89%, and total harmonic distortion in load current THDi decreased more than ten-fold to 2.38% for a non-linear load (uncontrolled bridge rectifier with load L). Additionally, symmetrisation of supply voltages and reactive power compensation Q of linear load was obtained. The UPQC integrated system for power quality improvement can be used wherever high-quality and PN-EN 50160 standard – compliant electricity is required.

DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2015402

Power-electronic devices of high and medium power, such as integrated rectifiers, thyristor control circuits, and transistor power circuits, which are commonly used in the industry, adversely affect the supply grid performance. They impair the quality of the electricity supplied to consumers.

Nonlinear loads distort the current waveforms in the supply line (generating higher current harmonics). The higher harmonic content in load currents cause additional voltage drops on the supply grid impedance and thus deformation of the sinusoidal voltage waveforms in the supply grid (generating higher voltage harmonics). Moreover, the first harmonic in the phase currents of loads supplied by inverters is shifted in phase relative to the first harmonic voltage. These loads, in addition to the energy associated with active power, draw additional energy associated with reactive power.

At the same time increases the number of industrial processes requiring electrical energy with high quality parameters. Therefore, it is necessary to use systems to improve power quality, such as reactive power compensators, passive filters, active series and shunt filters, and sets of integrated active filters. All these new, high-tech solutions are sources of innovation in transmission systems and supply lines.

This paper describes an integrated system for power quality improvement, so called Unified Power Quality Conditioner [1, 2, 5]. This system allows the stabilisation and symmetrisation of the load voltage, compensation of harmonic and subharmonic distortion in the supply line voltage, symmetrisation of the load

current, compensation of harmonic distortion in the load current, and the compensation of reactive power and fast-changing fluctuations of the load active power.

UPQC integrated system for power quality improvement

UPQC is made up of two inverters interconnected by a DC circuit. Because of the control convenience and cost VSI voltage source inverters are applied more often than CSI current source inverters. In either case in such a system the inverters along with passive low pass filters circuits LC function as active power filters APF. Depending on the nature of their operation and the method of their connection to the supply line one of the APF system is called Series Filter, and the other, Shunt Filter. Both APF circuits operate concurrently and independently from each other. The series filter is connected to the supply grid via a Series Injection Transformer. The shunt filter can be connected to the grid via a transformer or choke coupling Lk. In UPQC circuit the both active filters – series and shunt – are interconnected by a DC circuit that includes an energy storage in the form of capacitor coupled with voltage inverter, and in the form of reactor coupled with current inverter. This combination of two separate active filters allows solving most problems concerning power, voltage, and current quality. It is a popular topology used in power quality improvement systems. The active shunt filter plays a major role in the proper UPQC operation, providing the adequate level and stability of the voltage in the DC link. In order to compensate

reactive power and harmonic distortion in the load current, the system must generate a temporary waveform of booster current $i_k(t)$ that satisfies the equation:

$$i_k(t) = i_s^*(t) - i_o(t) \tag{1}$$

where:

$i_s^*(t)$ – reference current waveform, $i_o(t)$ – load current waveform. Just like the shunt filter, also the series filter, in order to compensate higher harmonics and undesirable positive and negative components in the temporary supply power waveform, must generate a temporary waveform of booster voltage $u_k(t)$ that satisfies the equation:

$$u_{sr}(t) = u_o^*(t) - u_s(t)$$

where:

$u_o^*(t)$ – reference voltage waveform, $u_s(t)$ – supply voltage waveform.

- (1) The criterion by which UPQC systems can be categorised is the sequence of the series and shunt filters' connection. The system, in which the series filter is on the load side, is coded UPQC-L [2]. Fig. 1 shows a system with UPQC-L topology. The system, in which the shunt filter is on the load side, is coded UPQC-R [2]. Fig. 2 shows a system with UPQC-R topology. UPQC-L system is more favourable to transformer T_r performance. In this case, owing to the load current compensation the transformer is not loaded with reactive power and higher harmonics in the load current.
- (2) Where the connection of both 1-phase and 3-phase loads to a grid is needed, it must be a 4-wire 3-phase AC grid. Fig. 3

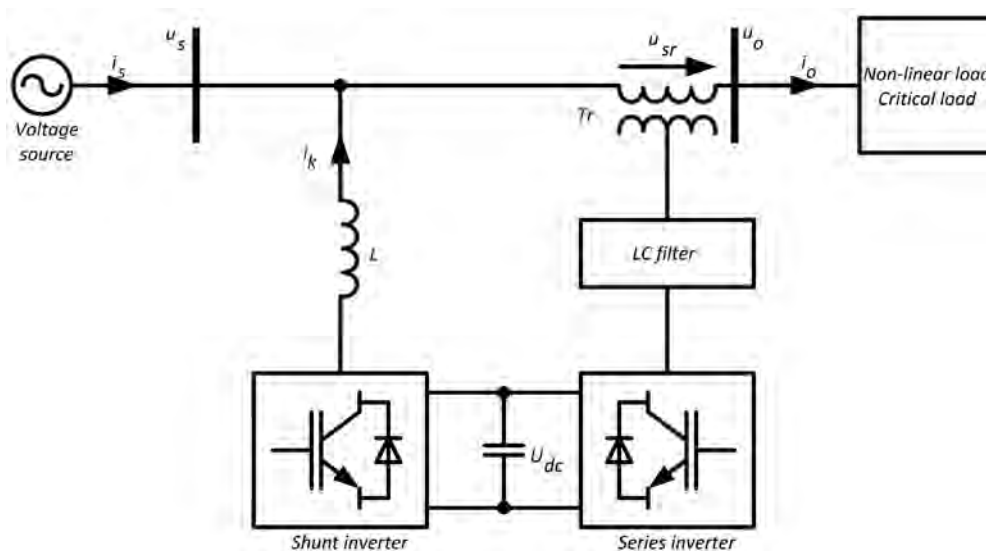


Fig. 1. UPQC-L integrated power quality improvement system

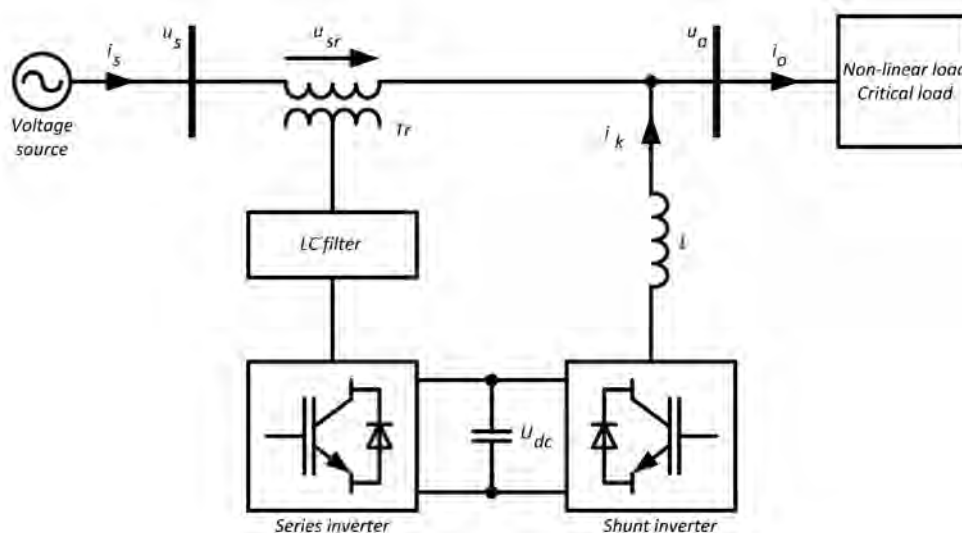


Fig. 2. UPQC-R integrated power quality improvement system

shows UPQC connected to 4-wire grid. The circuit in Fig. 3 has a divided capacitor with an outgoing neutral conductor in the DC link.

Results of UPQC laboratory tests

Subject to the tests was an UPQC with the topology shown in Fig. 3, and the tests were aimed at the compensation of harmonics in load conductor currents, compensation of load reactive power, stabilisation and symmetrisation of load conductor currents, compensation of harmonics in phase voltage, stabilisation of phase voltages, compensation of voltage dips, compensation of voltage surges, and compensation of phase voltage oscillations.

Compensation of harmonics in the phase voltage and conductor current of non-linear load supplying grid

A supply grid with distorted voltage u_s was modelled for the study. Prior to the compensation of harmonics, the percentage contents of individual harmonics in load voltage u_o amounted to:

$HD_3 = 10\%$, $HD_5 = 5\%$, $HD_7 = 2\%$. For this u_o voltage waveform the total harmonic distortion rate $THD = 11.36\%$. Due to non-linearity of the load, which was a six-pulse bridge rectifier, the following harmonics had the largest shares in i_o current waveform:

$HD_3 = 14.19\%$	$HD_{13} = 2.26\%$
$HD_5 = 21.35\%$	$HD_{15} = 2.22\%$
$HD_7 = 3.74\%$	$HD_{17} = 2.53\%$
$HD_9 = 3.60\%$	$HD_{19} = 1.25\%$
$HD_{11} = 4.88\%$	$HD_{21} = 1.21\%$

For this i_o current waveform the total harmonic distortion rate $THD = 27\%$.

Fig. 5a summarizes the harmonic contents in u_o load phase voltage before and after the harmonics compensation. The total harmonic distortion rate of u_o load phase voltage had decreased nearly six-fold and was $THD = 1.89\%$. Concurrent harmonics compensation in u_o load phase voltage and in i_o load conductor current did not result in drop of voltages $\pm u_{dc}$ in the DC link. They were kept constant.

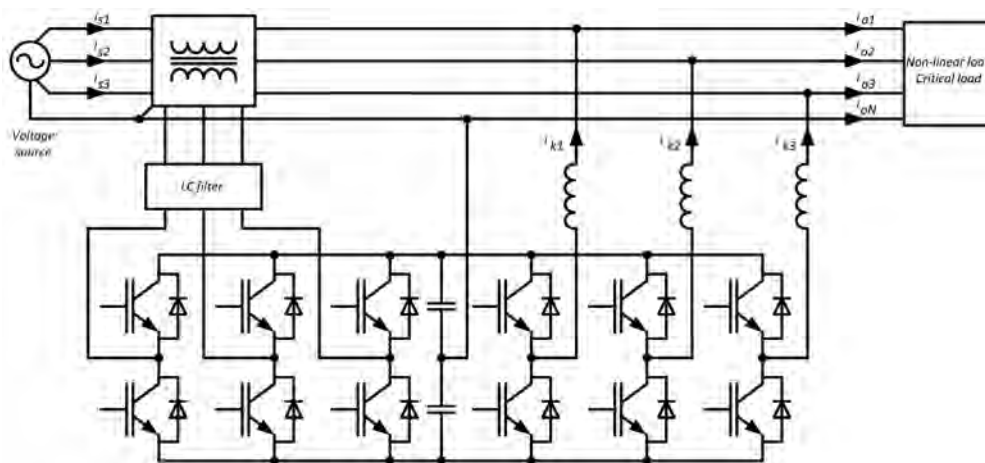


Fig. 3. UPQC connected to 4-wire 3-phase AC grid

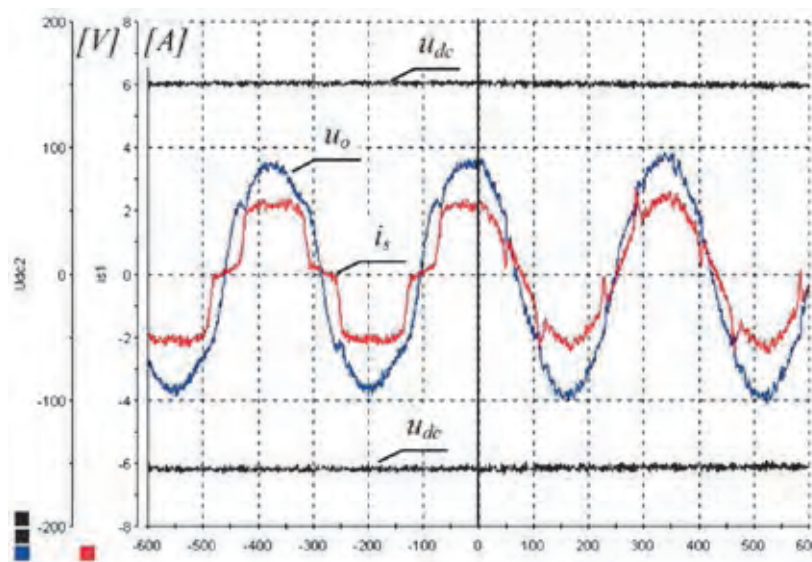


Fig. 4. Waveforms of load phase voltage u_o , grid line current i_s , and DC link voltages $\pm u_{dc}$ before and after harmonics compensation

Fig. 5b shows the harmonic contents in i_o load current and in the waveform of i_s conductor current drawn from the grid. After compensation they amounted to:

$HD_3 = 0.42\%$	$HD_{13} = 0.19\%$
$HD_5 = 1.62\%$	$HD_{15} = 0.16\%$
$HD_7 = 1.50\%$	$HD_{17} = 0.41\%$
$HD_9 = 0.35\%$	$HD_{19} = 0.23\%$
$HD_{11} = 0.37\%$	$HD_{21} = 0.29\%$

The total harmonic distortion rate for i_s current in the supplying grid lines after the compensation had decreased to $HD = 2.38\%$.

Compensation of load reactive power

Subject to the tests was a circuit with a RL type non-linear load. The power factors in each phase were: $\cos\varphi_1 = 0.96$ ($\varphi_1 = 16^\circ$ el.), $\cos\varphi_2 = 0.90$ ($\varphi_2 = 23,7^\circ$ el.), $\cos\varphi_3 = 0.83$ ($\varphi_3 = 34.21^\circ$ el.).

Compensation of load asymmetry

Subject to the tests was an UPQC with an asymmetric, linear, resistive, star-connected load. The load in the first phase was as

large as in the other phases. The load was supplied with an undistorted voltage. The waveforms of supply grid line currents i_{s1} , i_{s2} , i_{s3} and of DC link voltages $\pm u_{dc}$ are shown in Fig. 7.

With the load asymmetry compensation on, the waveforms of supply grid line currents i_{s1} , i_{s2} , i_{s3} are symmetrised and stabilised. The waveforms of each line load current i_{o1} , i_{o2} , i_{o3} were appropriately averaged, so that each phase was equally loaded. The waveforms of supply grid line currents i_{s1} , i_{s2} , i_{s3} are in phase with the waveforms of supply line voltages u_{s1} , u_{s2} , u_{s3} . With the load asymmetry compensation on, average voltages $\pm u_{dc}$ in the DC link remained unchanged. They are kept at a constant level.

Compensation of sub-harmonics in load phase voltage – swings

Subject to the tests was a circuit with an asymmetric, linear, resistive, star-connected load. The load was supplied with 3-phase sinusoidal a voltage. In addition a sub-harmonic (voltage swing) with frequency 2.5 Hz and amplitude 20% of the load voltage amplitude was added to the load phase voltage waveforms.

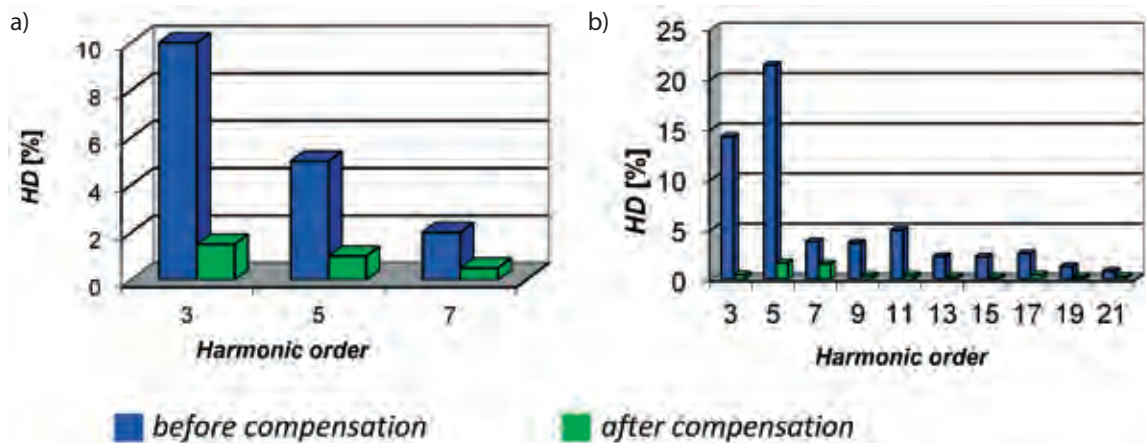


Fig. 5a. Harmonic contents in u_o load phase voltage

Fig. 5b. Harmonic contents in i_s supply grid line current

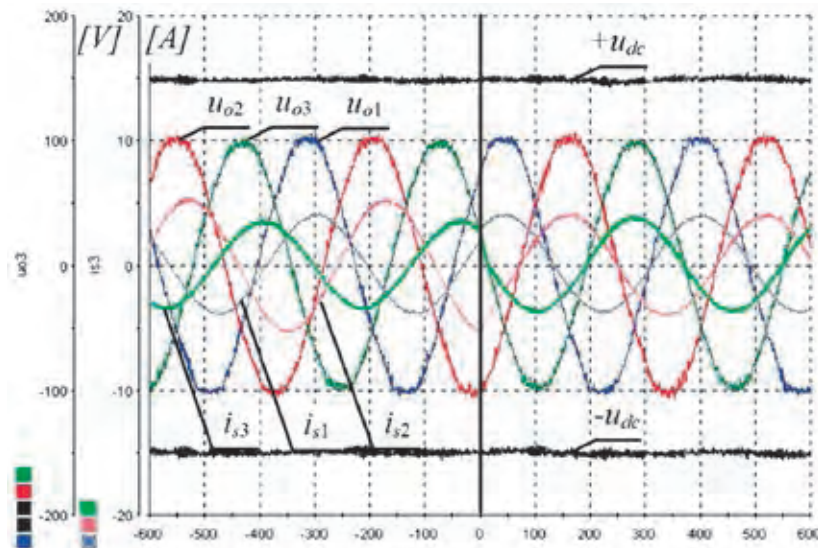


Fig. 6. Waveforms of load phase voltages u_{o1} , u_{o2} , u_{o3} , supply grid line currents i_{s1} , i_{s2} , i_{s3} , and voltage $\pm u_{dc}$ in DC circuit

Fig. 8 shows the waveforms of load phase voltages u_{o1} , u_{o2} , u_{o3} and of voltage $\pm u_{dc}$ in the DC intermediate circuit.

With the compensation of sub-harmonics in load phase voltage $u_{o1,2,3}$ on, the phase voltage amplitude is stabilised at a pre-set level. In the waveforms of voltage $\pm u_{dc}$ in the DC link appears a sub-harmonic with the sub-harmonic frequency of the load voltage, and the amplitude equal to 50% of the swing amplitude.

Compensation of short-term phase voltage dip

Subject to the tests was an UPQC with a symmetric, linear, resistive, star-connected load. The load was supplied with sinusoidal voltage $u_{o1,2,3}$. In addition, a dip of 10% of the voltage amplitude and duration of 200 ms was added to the waveforms of grid phase voltages.

Fig. 9 shows the waveforms of load phase voltages u_{o1} , u_{o2} , u_{o3} and of voltage $\pm u_{dc}$ in the DC intermediate circuit.

With the compensation of load voltages u_{o1} , u_{o2} , u_{o3} dips on, the phase voltage amplitude is stabilised at a pre-set level. Upon a dip occurrence there is a drop by 50% of the dip amplitude in the waveforms of voltage $\pm u_{dc}$ in the DC link.

Compensation of load phase voltages asymmetry

Subject to the tests was a circuit with an asymmetric, linear, resistive, star-connected load. Fig. 10 shows the waveforms of load phase voltages u_{o1} , u_{o2} , u_{o3} and of voltage $\pm u_{dc}$ in the DC intermediate circuit. In the second and third phase a 20% and 40% phase voltage dip was modelled, respectively. The first phase amplitude remained unchanged.

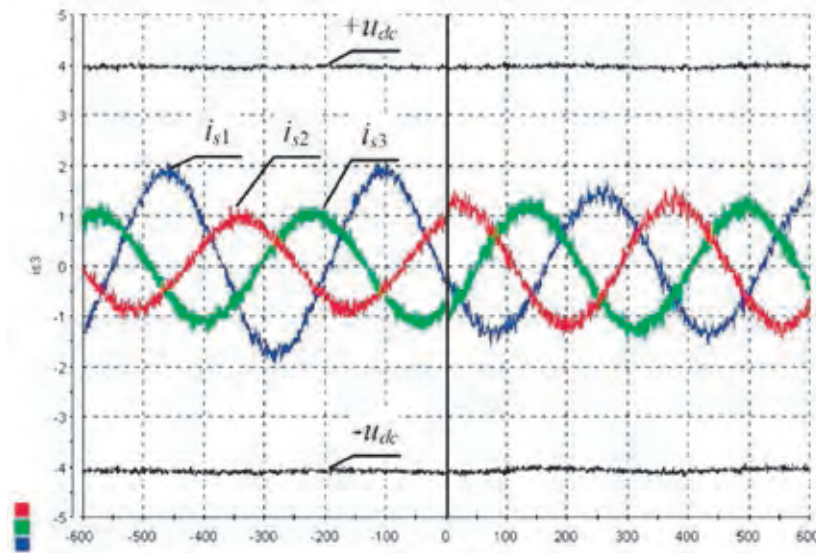


Fig. 7. Waveforms of supply grid line currents i_{s1} , i_{s2} , i_{s3} before and after load asymmetry compensation

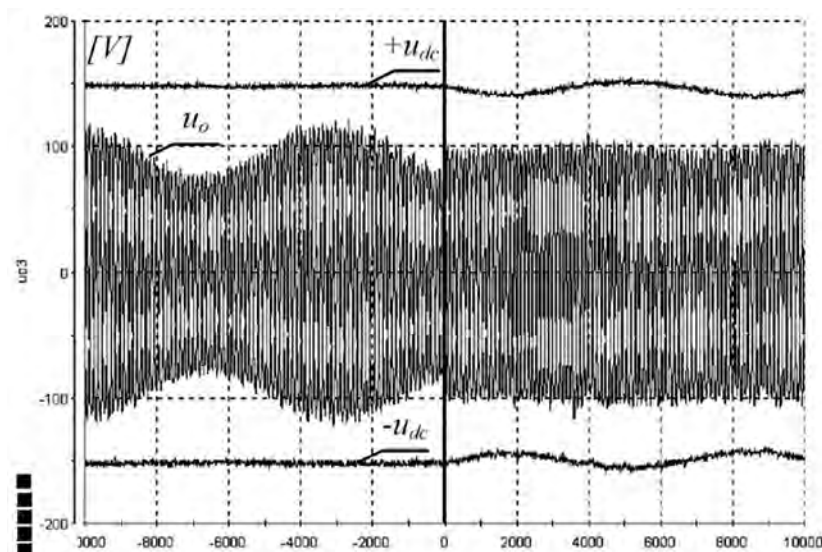


Fig. 8. Waveforms of load phase voltages u_{o1} , u_{o2} , u_{o3} with 20% swing before and after compensation of phase voltage swings

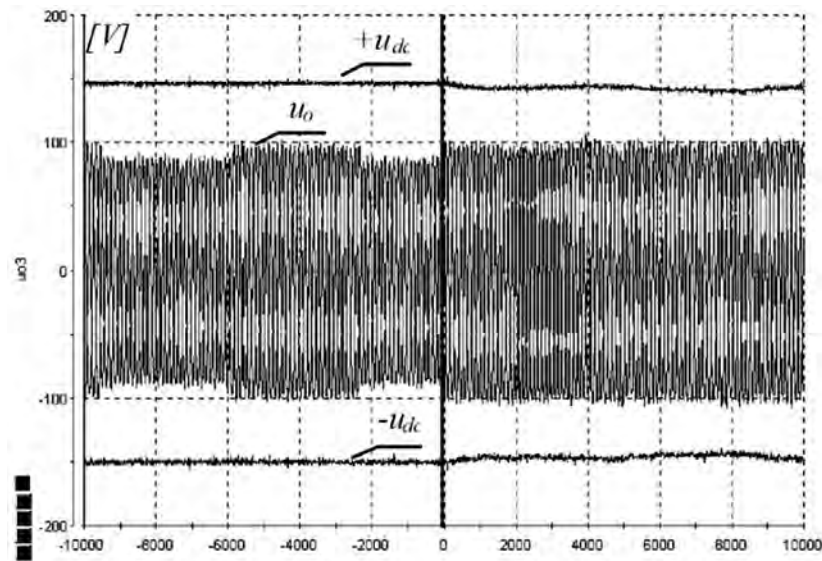


Fig. 9. Waveforms of load phase voltages u_{o1} , u_{o2} , u_{o3} with 10% voltage dip before and after compensation of voltage dips

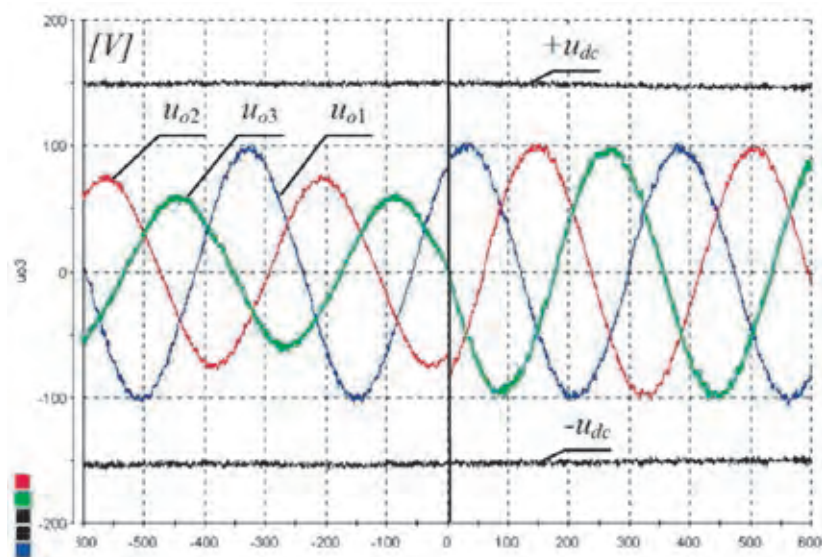


Fig. 10. Waveforms of load phase voltages u_{o1} , u_{o2} , u_{o3} and of voltage $\pm u_{dc}$ in the DC circuit

6. Conclusions

The study has confirmed the possibility of UPQC circuit's positive impact on the supply grid in terms of improved power quality of electricity through:

- compensation of harmonic currents in load conductors
- compensation of load reactive power
- stabilisation and symmetrisation of currents in load conductors
- compensation of harmonic phase voltages
- stabilisation of phase voltages
- compensation of voltage dips
- compensation of voltage surges
- compensation of phase voltage oscillations.

REFERENCES

1. V. Khadkikar, "Enhancing Electric Power Quality Using UPQC: A Comprehensive Overview", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 27, No. 5, pp. 2284–2297, 2012.
2. A. Ghosh, G. Ledwich, *Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices*, Boston, MA: Kluwer, 2002.
3. R. Rajasree, S. Premalatha, Unified power quality conditioner (UPQC) control using feed forward (FF)/feedback (FB) controller, *IEEE Computer, Communication and Electrical Technology*, 18–19.03.2011, pp. 364–369.

4. R. Strzelecki, H. Supronowicz, "Współczynnik mocy w systemach zasilania prądu przemiennego i metody jego poprawy" [Power factor in AC power supply systems and methods of its improvement], Publishing House of Warsaw University of Technology, Warszawa 2000.
 5. H. Fujita, H. Akagi, "The unified power quality conditioner: The integration of series and shunt-active filters", *Transactions on Power Electronics*, Vol. 13, No. 2, pp. 315–322, 1998.
-

Piotr Fabijański

Warsaw University of Technology

e-mail: piotr.fabijanski@ee.pw.edu.pl

A graduate of the Faculty of Electrical Engineering of Warsaw University of Technology, where he also obtained his doctoral degree (2009). His research interests include: power quality in AC supply grids and its improvement, reactive power compensation, active filtering of harmonic in voltage and current waveforms, active series and shunt filters.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 15–21. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Poprawa jakości energii elektrycznej w sieciach zasilających prądu przemiennego

Autor

Piotr Fabijański

Słowa kluczowe

jakość energii elektrycznej, UPQC, APF, współczynnik THD, współczynnik HD

Streszczenie

W artykule opisano model cyfrowy i rzeczywisty zintegrowanego układu do poprawy jakości energii elektrycznej UPQC (ang. *Unified Power Quality Conditioner*). Budowa układu UPQC oraz sposób jego dołączenia do sieci zasilającej prądu przemiennego, zarówno 1-fazowej, jak i 3-fazowej, umożliwiają skuteczną kompensację niepożądanych zakłóceń występujących w przebiegach napięć zasilających odbiorniki, jak i prądach pobieranych przez nieliniowe odbiorniki. W artykule przedstawiono przegląd topologii oraz strategii sterowania. Przeprowadzone badania układu UPQC potwierdziły jego pozytywny wpływ na jakość energii elektrycznej. Uzyskano istotną poprawę parametrów energii elektrycznej. Współczynnik zawartości wyższych harmonicznych w napięciu zasilającym THD_u (ang. *Total Harmonic Distortion Voltage*) zmniejszył się sześciokrotnie do wartości 1,89%, współczynnik zawartości wyższych harmonicznych w prądzie odbiornika THD_i (ang. *Total Harmonic Distortion Current*) zmniejszył się ponad dziesięciokrotnie, do 2,38% dla odbiornika nieliniowego (niesterowany prostownik mostkowy z obciążeniem L). Dodatkowo uzyskano symetryzację napięć zasilających oraz kompensację mocy biernej Q odbiornika liniowego. Zintegrowany układ do poprawy jakości energii elektrycznej UPQC może być stosowany wszędzie tam, gdzie wymagana jest energia elektryczna o wysokiej jakości, spełniająca wymagania normy PN-EN 50160.

Urządzenia energoelektroniczne dużej i średniej mocy, takie jak układy prostownikowe, tyrystorowe układy regulacyjne, tranzystorowe układy mocy, które są powszechnie stosowane w przemyśle, niekorzystnie wpływają na parametry sieci zasilającej. Pogarszają one jakość energii elektrycznej dostarczanej do odbiorcy.

Nieliniowe odbiorniki powodują odkształcenie przebiegów prądów w linii zasilającej (generując wyższe harmoniczne prądu). Wyższe harmoniczne w prądach odbiornika wywołują dodatkowe spadki napięć na impedancjach sieci zasilającej, a zatem odkształcenie sinusoidalnych przebiegów napięć w sieci zasilającej (generując wyższe harmoniczne napięcia). Ponadto pierwsza harmoniczna w prądach fazowych odbiorników zasilanych przez przekształtniki jest przesunięta w fazie względem pierwszej harmonicznej napięcia. Odbiorniki te oprócz energii związanej z mocą czynną pobierają dodatkową energię związaną z mocą bierną.

Jednocześnie wzrasta liczba procesów przemysłowych wymagających energii elektrycznej o wysokich parametrach jakościowych. Dlatego jest konieczne stosowanie układów do poprawy jakości energii elektrycznej, takich jak kompensatory mocy biernej, filtry pasywne oraz filtry aktywne szeregowo i równoległe oraz układy zintegrowanych filtrów aktywnych. Wszystkie te nowe, zaawansowane technicznie rozwiązania są źródłem innowacyjności w systemach przesyłowych i liniach zasilania.

W artykule przedstawiono zintegrowany układ do poprawy jakości energii elektrycznej UPQC (ang. *Unified Power Quality Conditioner*) [1, 2, 5]. Układ ten umożliwia stabilizację i symetryzację napięć na odbiorniku, kompensację harmonicznych i subharmonicznych w napięciu sieci zasilającej, symetryzację prądu odbiornika, kompensację harmonicznych w prądzie odbiornika, kompensację mocy biernej oraz szybkozmiennych wahań mocy czynnej odbiornika.

Zintegrowany układ do poprawy jakości energii elektrycznej UPQC

Układ UPQC zbudowany jest z dwóch falowników połączonych ze sobą obwodem prądu stałego. Ze względu na wygodę sterowania oraz koszty częściej stosuje się falowniki napięcia VSI niż falowniki prądu CSI. W obu wypadkach w układzie tym falowniki wraz z układami pasywnych dolnoprzepustowych filtrów LC pełnią rolę filtrów aktywnych APF (ang. *Active Power Filter*). W zależności od charakteru pracy i sposobu dołączenia do linii zasilającej jeden z układów APF jest nazywany filtrem szeregowym (ang. *Series Filter*), a drugi filtrem równoległym (ang. *Shunt Filter*). Oba układy APF pracują jednocześnie i niezależnie od siebie. Filtr szeregowy dołączony jest do sieci zasilającej zawsze poprzez szeregowy transformator dodawczy (ang. *Series Injection Transformer*). Filtr równoległy może być dołączony do sieci poprzez transformator lub dławik sprzęgający L_k . W układzie UPQC oba filtry aktywne – szeregowy i równoległy – połączone są ze sobą obwodem prądu stałego, w którym znajduje się magazyn energii w postaci kondensatora w układzie z falownikiem napięcia oraz w postaci dławika w układzie z falownikiem prądu. Takie połączenie dwóch oddzielnych filtrów aktywnych pozwala rozwiązać większość problemów dotyczących jakości energii elektrycznej, napięcia i prądu. Jest to popularna topologia, stosowana w systemach do poprawy jakości energii elektrycznej. Aktywny filtr równoległy odgrywa główną rolę w poprawnym działaniu układu UPQC, zapewniając odpowiedni poziom oraz stabilizację napięcia w obwodzie pośredniczącym prądu stałego. W celu kompensacji mocy biernej oraz wyższych harmonicznych w prądzie odbiornika układ musi generować przebieg chwilowy prądu dodatkowego $i_k(t)$ spełniający równanie:

$$i_k(t) = i_s^*(t) - i_o(t) \quad (1)$$

gdzie:

$i_s^*(t)$ – wzorcowy przebieg prądu, $i_o(t)$ – przebieg prądu odbiornika.

Podobnie jak filtr równoległy, tak i filtr szeregowy, w celu kompensacji wyższych harmonicznych oraz niepożądanych składowych zgodnych i przeciwnych w przebiegu chwilowym napięcia zasilającego, musi generować przebieg chwilowy napięcia dodatkowego $u_k(t)$ spełniający równanie:

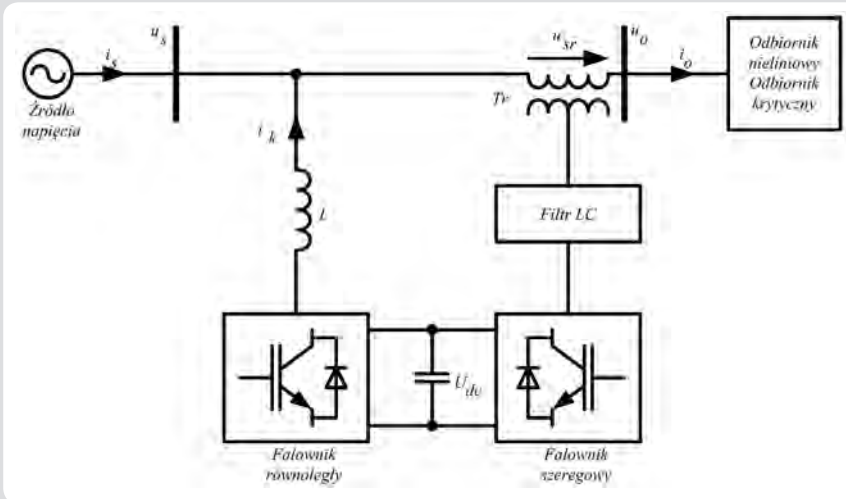
$$u_{sr}(t) = u_o^*(t) - u_s(t) \quad (2)$$

gdzie:

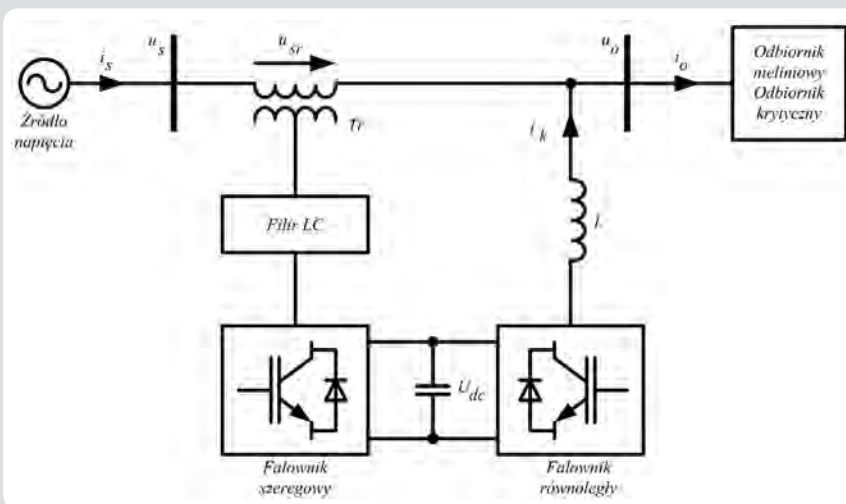
$u_o^*(t)$ – wzorcowy przebieg napięcia, $u_s(t)$ – przebieg napięcia zasilającego.

Kryterium, według którego można podzielić układy UPQC, jest kolejność podłączenia filtru szeregowego i równoległego. Dla układu, w którym filtr szeregowy znajduje się od strony odbiornika, stosuje się akronim UPQC-L [2]. Na rys. 1 pokazano układ o topologii UPQC-L. Układ, w którym od strony odbiornika znajduje się filtr równoległy, opisuje akronim UPQC-R [2]. Na rys. 2 pokazano układ o topologii UPQC-R.

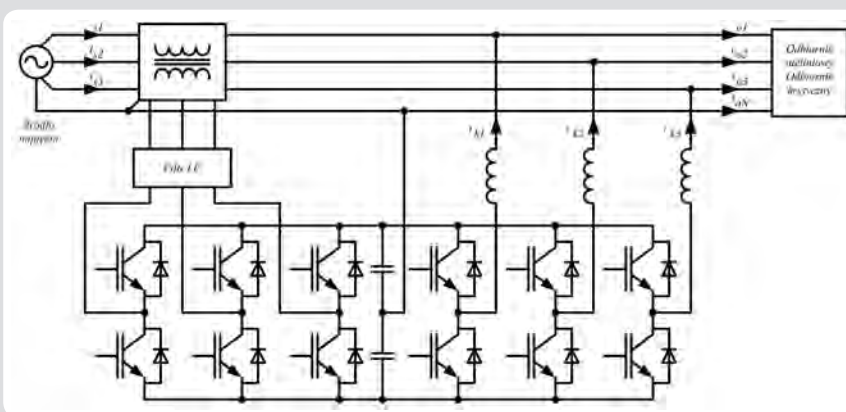
Układ o topologii UPQC-L jest układem korzystniejszym dla pracy transformatora Tr. W takim wypadku dzięki kompensacji prądu odbiornika transformator nie jest obciążony mocą bierną oraz wyższymi harmonicznymi w prądzie odbiornika. Konieczność podłączenia do sieci zarówno 1-fazowych, jak i 3-fazowych odbiorników wymusza stosowanie czteroprzewodowych 3-fazowych sieci prądu przemiennego. Na rys. 3 pokazano układ UPQC podłączony do sieci czteroprzewodowej. Układ z rys. 3 posiada w obwodzie prądu stałego dzielony kondensator z wyprowadzonym przewodem zerowym.



Rys. 1. Zintegrowany układ do poprawy jakości energii elektrycznej UPQC-L



Rys. 2. Zintegrowany układ do poprawy jakości energii elektrycznej UPQC-R



Rys. 3. UPQC podłączony do sieci czteroprzewodowej 3-fazowej prądu przemiennego

Wyniki badań laboratoryjnych UPQC
 Badania układu UPQC zostały przeprowadzone dla układu o topologii z rys. 3 pod kątem kompensacji harmonicznych w prądach przewodowych odbiornika, kompensacji mocy biernej odbiornika,

stabilizacji i symetryzacji prądów przewodowych odbiornika, kompensacji harmonicznych w napięciu fazowym, stabilizacji napięć fazowych, kompensacji zapadów napięcia, kompensacji przepięć, kompensacji kołysań napięcia fazowego.

Kompensacja harmonicznych w napięciu fazowym i prądzie przewodowym sieci zasilającej odbiornik nieliniowy

W badaniu zamodelowano sieć zasilającą o odkształconym napięciu u_s . Przed kompensacją harmonicznych zawartość procentowa poszczególnych harmonicznych w napięciu odbiornika u_o wynosi: $HD_3 = 10\%$, $HD_5 = 5\%$, $HD_7 = 2\%$. Dla takiego kształtu przebiegu napięcia u_o współczynnik całkowitego odkształcenia wynosi $THD = 11,36\%$. Ze względu na nieliniowy charakter odbiornika, jakim jest sześciopulsowy prostownik mostkowy, w przebiegu prądu przewodowego i_o największy udział mają harmoniczne:

$HD_3 = 14,19\%$	$HD_{13} = 2,26\%$
$HD_5 = 21,35\%$	$HD_{15} = 2,22\%$
$HD_7 = 3,74\%$	$HD_{17} = 2,53\%$
$HD_9 = 3,60\%$	$HD_{19} = 1,25\%$
$HD_{11} = 4,88\%$	$HD_{21} = 1,21\%$

Dla takiego kształtu przebiegu prądu i_o współczynnik całkowitego odkształcenia wynosi $THD = 27\%$ (rys. 4).

Na rys. 5a zestawiono zawartość harmonicznych w przebiegu napięcia fazowego odbiornika u_o przed i po skompensowaniu harmonicznych. Współczynnik całkowitego odkształcenia dla napięcia odbiornika u_o zmalał blisko sześciokrotnie i wynosi $THD = 1,89\%$. Jednoczesne włączenie kompensacji harmonicznych w napięciu fazowym odbiornika u_o oraz w prądzie przewodowym odbiornika i_o nie powoduje spadku napięć $\pm u_{dc}$ w obwodzie pośredniczącym. Są one utrzymywane na stałym poziomie.

Na rys. 5b pokazano zawartość harmonicznych w prądzie odbiornika i_o i w przebiegu prądu przewodowego pobieranego z sieci zasilającej i_s . Po kompensacji jest ona równa:

$HD_3 = 0,42\%$	$HD_{13} = 0,19\%$
$HD_5 = 1,62\%$	$HD_{15} = 0,16\%$
$HD_7 = 1,50\%$	$HD_{17} = 0,41\%$
$HD_9 = 0,35\%$	$HD_{19} = 0,23\%$
$HD_{11} = 0,37\%$	$HD_{21} = 0,29\%$

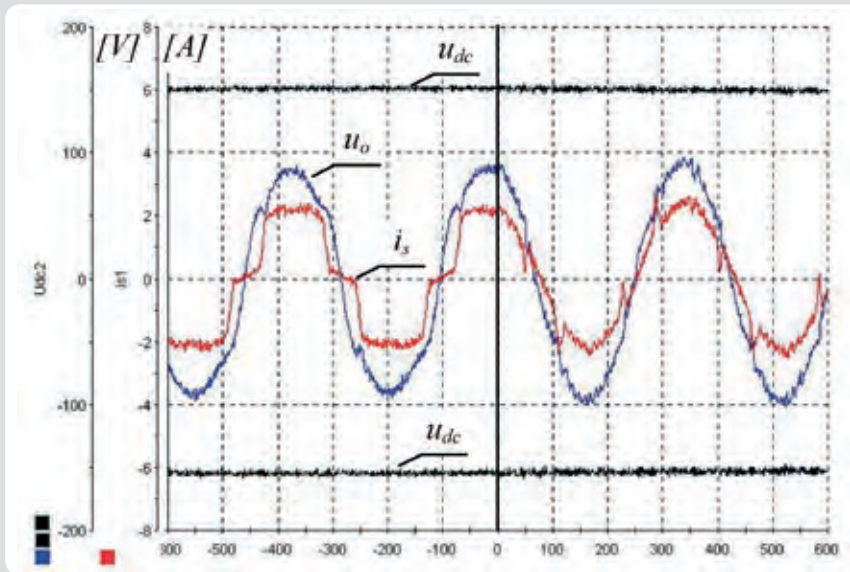
Współczynnik całkowitego odkształcenia dla prądu przewodowego sieci zasilającej i_s po kompensacji zmniejszył się do wartości $THD = 2,38\%$.

Kompensacja mocy biernej odbiornika

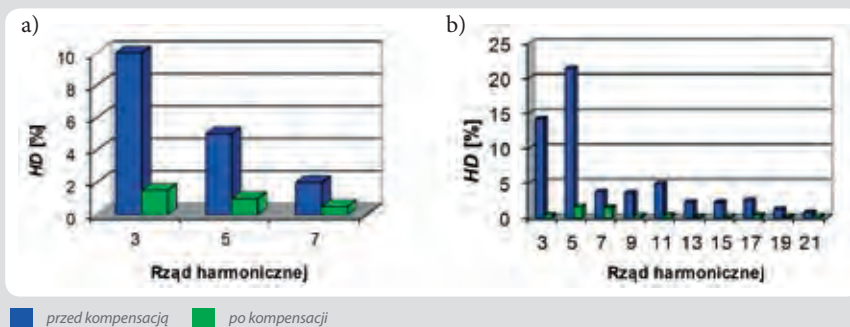
Badania wykonano dla układu z niesymetrycznym odbiornikiem liniowym typu RL. Współczynnik mocy dla poszczególnych faz wynosi: $\cos\varphi_1 = 0,96$ ($\varphi_1 = 16^\circ$ el.), $\cos\varphi_2 = 0,90$ ($\varphi_2 = 23,7^\circ$ el.), $\cos\varphi_3 = 0,83$ ($\varphi_3 = 34,21^\circ$ el.) (rys. 6).

Kompensacja niesymetrii odbiornika

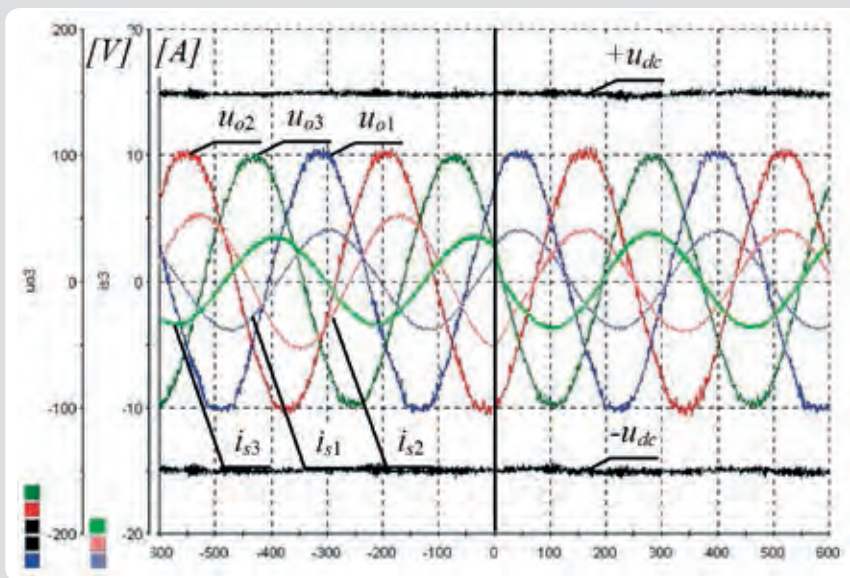
Badania przeprowadzono dla układu UPQC z niesymetrycznym odbiornikiem liniowym o charakterze rezystancyjnym połączonym w gwiazdę. Obciążenie w fazie pierwszej jest dwukrotnie większe niż w fazach pozostałych. Odbiornik jest zasilany napięciem nieodkształconym. Przebieg prądu przewodowego sieci zasilającej i_{s1} , i_{s2} , i_{s3} oraz przebiegi napięć w obwodzie pośredniczącym $\pm u_{dc}$ przedstawiono na rys. 7.



Rys. 4. Przebieg napięcia fazowego odbiornika u_o , przebieg prądu przewodowego sieci i_s , przebiegi napięć w obwodzie pośredniczącym $\pm u_{dc}$ przed i po skompensowaniu harmonicznych



Rys. 5a. Zawartość harmonicznych w napięciu fazowym odbiornika u_o
Rys. 5b. Zawartość harmonicznych w prądzie przewodowym sieci zasilającej i_s



Rys. 6. Przebieg napięć fazowych odbiornika u_{o1} , u_{o2} , u_{o3} , prądów przewodowych sieci zasilającej i_{s1} , i_{s2} , i_{s3} oraz przebiegi napięć $\pm u_{dc}$ w obwodzie stałoprądowym

Po włączeniu kompensacji niesymetrii odbiornika następuje symetryzacja i stabilizacja przebiegów prądów przewodowych sieci zasilającej i_{s1} , i_{s2} , i_{s3} . Przebiegi poszczególnych prądów przewodowych odbiornika i_{o1} , i_{o2} , i_{o3} zostają odpowiednio uśrednione, tak aby każda z faz była tak samo obciążona. Przebiegi prądów przewodowych sieci zasilającej i_{s1} , i_{s2} , i_{s3} są w fazie z przebiegami napięć linii zasilającej u_{s1} , u_{s2} , u_{s3} . Po włączeniu kompensacji niesymetrii odbiornika wartości średnie napięć $\pm u_{dc}$ w obwodzie pośredniczącym pozostają bez zmian. Utrzymywane są one na stałym poziomie.

Kompensacja subharmonicznych w napięciu fazowym odbiornika – kołysanie

Badania przeprowadzono dla układu z symetrycznym odbiornikiem liniowym o charakterze rezystancyjnym połączonym w gwiazdę. Odbiornik jest zasilany napięciem 3-fazowym o przebiegu sinusoidalnym. Dodatkowo do przebiegów napięć fazowych odbiornika dodano subharmoniczną (kołysanie napięcia) o częstotliwości 2,5 Hz i amplitudzie 20% amplitudy napięcia odbiornika.

Na rys. 8. przedstawiono przebiegi napięć fazowych odbiornika u_{o1} , u_{o2} , u_{o3} oraz przebiegi napięć w obwodzie pośredniczącym $\pm u_{dc}$.

Po włączeniu kompensacji subharmonicznych w napięciu odbiornika $u_{o1,2,3}$ następuje stabilizacja amplitudy napięcia fazowego na zadanym poziomie. W przebiegach napięć $\pm u_{dc}$ w obwodzie pośredniczącym pojawia się subharmoniczna o częstotliwości subharmonicznej występującej w napięciu odbiornika i amplitudzie stanowiącej 50% amplitudy kołysania.

Kompensacja krótkotrwałego zapadu napięcia fazowego

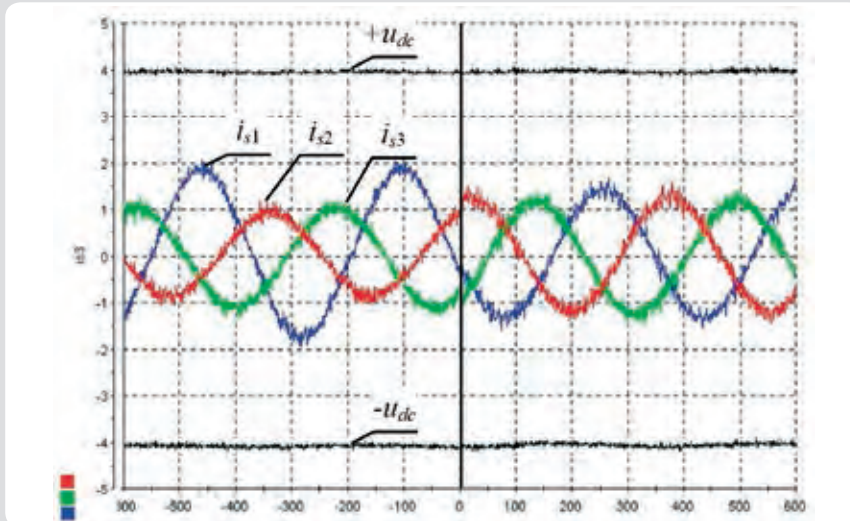
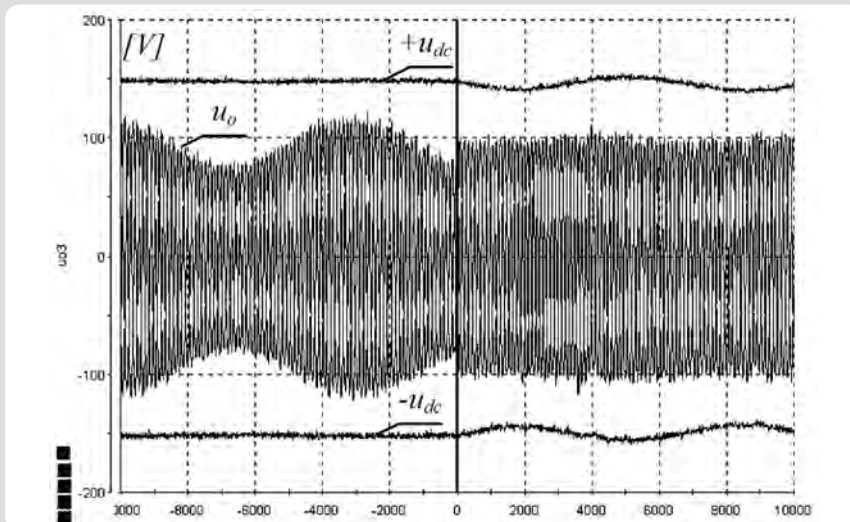
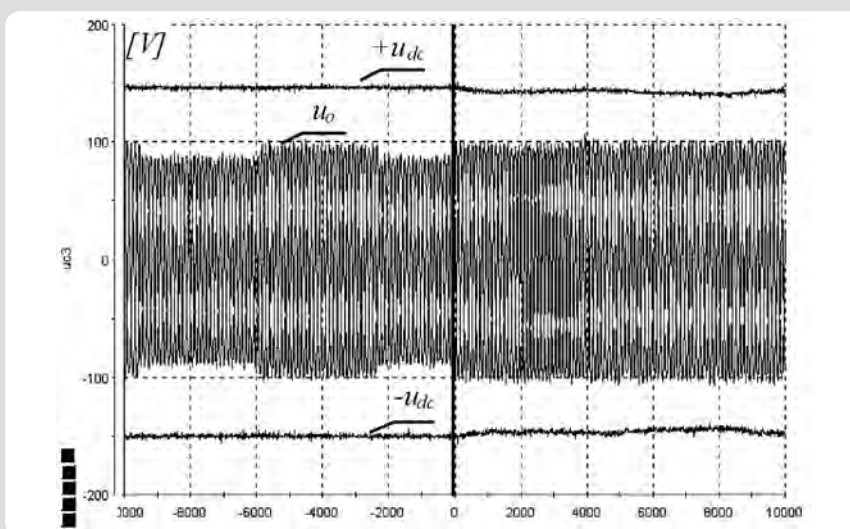
Badania przeprowadzono dla układu UPQC z symetrycznym odbiornikiem liniowym o charakterze rezystancyjnym połączonym w gwiazdę. Odbiornik jest zasilany napięciem $u_{o1,2,3}$ o przebiegu sinusoidalnym. Dodatkowo do przebiegów napięć fazowych sieci dodano zapad napięcia o wartości 10% amplitudy napięcia i czasie trwania 200 ms.

Na rys. 9. przedstawiono przebiegi napięć fazowych odbiornika u_{o1} , u_{o2} , u_{o3} oraz przebiegi napięć w obwodzie pośredniczącym $\pm u_{dc}$.

Po włączeniu kompensacji zapadu napięć odbiornika u_{o1} , u_{o2} , u_{o3} następuje stabilizacja amplitudy napięcia fazowego na zadanym poziomie. W przebiegach napięć $\pm u_{dc}$ w obwodzie pośredniczącym w momencie wystąpienia zapadu pojawia się spadek napięcia o wartości 50% amplitudy zapadu.

Kompensacja niesymetrii napięć fazowych odbiornika

Badania przeprowadzono dla układu z symetrycznym odbiornikiem liniowym o charakterze rezystancyjnym połączonym w gwiazdę. Na rys. 10 pokazano przebiegi napięć fazowych odbiornika u_{o1} , u_{o2} , u_{o3} oraz przebiegi napięć $\pm u_{dc}$ w obwodzie stałoprądowym. W fazie drugiej zamodelowano 20-proc. zapad napięcia fazowego a w fazie trzeciej 40-proc. Amplituda fazy pierwszej pozostaje bez zmian.

Rys. 7. Przebiegi prądów przewodowych sieci zasilającej i_{s1} , i_{s2} , i_{s3} przed i po kompensacji niesymetrii odbiornikaRys. 8. Przebiegi napięć fazowych odbiornika u_{o1} , u_{o2} , u_{o3} z kołysaniem 20% przed i po kompensacji kołysania napięcia fazowegoRys. 9. Przebiegi napięć fazowych odbiornika u_{o1} , u_{o2} , u_{o3} na odbiorniku z zapadem 10% przed i po kompensacji zapadu

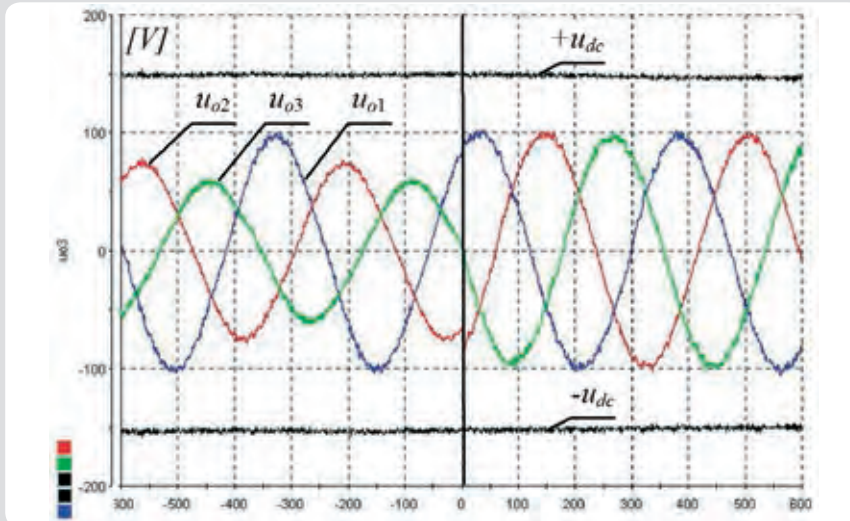
Wnioski

W ramach badań zostały potwierdzone możliwości pozytywnego oddziaływania układu UPQC na sieć zasilającą pod kątem poprawy jakości energii elektrycznej poprzez:

- kompensację harmonicznych w prądach przewodowych odbiornika
- kompensację mocy biernej odbiornika
- stabilizację i symetryzację prądów przewodowych odbiornika
- kompensację harmonicznych w napięciu fazowym
- stabilizację napięć fazowych
- kompensację zapadów napięcia
- kompensację przepięć
- kompensację kołysań napięcia fazowego.

Bibliografia

1. Khadkikar V., Enhancing Electric Power Quality Using UPQC: A Comprehensive Overview, *IEEE Transactions on Magnetics* 2012, Vol. 27, No. 5, s. 2284–2297.
2. Ghosh A., Ledwich G., Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices, Boston, MA: Kluwer, 2002.
3. Rajasree R., Premalatha S., Unified power quality conditioner (UPQC) control using feed forward (FF)/feedback (FB) controller, *IEEE Computer, Communication and Electrical Technology*, 18-19.03.2011, s. 364–369.
4. Strzelecki R., Supronowicz H., Współczynnik mocy w systemach zasilania prądu przemianowego i metody jego poprawy, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
5. Fujita H., Akagi H., The unified power quality conditioner: The integration of series and shunt-active filters, *Transactions on Power Electronics* 1998, Vol. 13, No. 2, s. 315–322.



Rys. 10. Przebiegi napięć fazowych odbiornika u_{o1} , u_{o2} , u_{o3} oraz przebiegi napięć w obwodzie stałoprądowym $\pm u_{dc}$

Piotr Fabijański

dr inż.

Politechnika Warszawska

e-mail: piotr.fabijanski@ee.pw.edu.pl

Studia odbył na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej, stopień doktora nauk technicznych uzyskał na swoim macierzystym wydziale (2009). Jego zainteresowania badawcze to: jakość energii elektrycznej w sieciach zasilających prądu przemiennego oraz jej poprawa, kompensacja mocy biernej, aktywna filtracja wyższych harmonicznych w przebiegach napięcia i prądu, aktywne filtry szeregowe i równoległe.