

## Współpraca energoelektronicznego kompensatora MMC z piecem łukowym AC

**Streszczenie.** Przedmiotem artykułu jest zastosowanie wielopoziomowego modulatora MMC zbudowanego z  $n$  jednofazowych mostków mocy PM, w których elementami kluczującymi są tranzystory IGBT. Poprzez włączenie ich do trzech gałęzi połączonych w trójkąt do obwodu wtórnego transformatora sieciowego wraz z równoległymi filtrami wyższych harmonicznych uzyskuje się pełną i szybką kompensację składowych biernych indukcyjnych i pojemnościowych prądu obciążenia przy jednoczesnej minimalizacji wahań napięcia zasilającego transformatora pieca łukowego AC. Przedstawiono interesujące wskaźniki charakteryzujące parametry jakości pobieranej energii z sieci elektroenergetycznej.

**Abstract.** The subject of the article is the application of a modular multilevel converter (MMC) built of  $n$  single-phase PM power bridges, in which the keying elements are IGBT transistors. By connecting them to three branches connected in a delta to the secondary circuit of the network transformer with parallel filters of higher harmonics, full and fast compensation of inductive and capacitive reactive components of the load current is obtained, while minimizing fluctuations of the voltage supplying the AC arc furnace transformer. Interesting indicators characterizing the quality parameters of energy taken from the power grid have been presented. (**Cooperation of the modular multilevel converter with the AC arc furnace**).

**Słowa kluczowe:** piec łukowy (EAF) AC, pasywne filtry harmoniczných, SVC, STATCOM

**Keywords:** electric arc furnace (EAF) AC, passive harmonic filters, SVC, STATCOM

### Wstęp

Praca odbiorników energii elektrycznej o nieliniowych charakterystykach napięciowo-prądowych, zasilanych zarówno z publicznych, jak również z przemysłowych sieci elektroenergetycznych, może powodować szereg zaburzeń elektromagnetycznych, mających bezpośredni wpływ na degradację jakości energii elektrycznej dostarczanej do odbiorców. Zasadnicze znaczenie z punktu widzenia jakości energii elektrycznej wykazuje praca odbiorników energii elektrycznej użytkowanych w przemyśle hutniczym, w tym w szczególności: pieców łukowych AC oraz pieców indukcyjnych wyposażonych w przekształtniki energoelektroniczne, generujących wyższe harmoniczne prądów i powodujących zaburzenia napięcia w punkcie wspólnego przyłączenia PCC (ang. *point of common coupling*).

Również istotnego znaczenia z punktu widzenia jakości energii elektrycznej nabiera stale rosnąca liczba przyłączanych do sieci elektroenergetycznej rozproszonych źródeł odnawialnej energii elektrycznej (turbiny wiatrowe, farmy wiatrowe, instalacje fotowoltaiczne), a także systemów magazynowania energii elektrycznej. Na jakość dostarczanej energii elektrycznej mają także wpływ rozbudowane systemy przesyłu energii, w tym szczególnie układy HVDC [11], których praca przyczynia się do generowania niesinusoidalnych prądów.

Znaczna część odbiorników energoelektronicznych, głównie napędów AC i DC, charakteryzuje się zdefiniowanymi widmami wyższych harmonicznych prądów generowanych przez te odbiorniki. Drugą grupę stanowią odbiorniki o bardzo dużych mocach jednostkowych i niespokojnym, wręcz stochastycznym, poborze mocy czynnej i biernej. Do tej grupy odbiorników zaliczają się piece łukowe prądu przemiennego AC. Moc pobierana przez piece łukowe z sieci elektroenergetycznej zależy w głównej mierze od masy i rodzaju wsadu, a także od zastosowanych metod kompensacji mocy biernej. W odniesieniu do parametrów sieci zasilającej wymagana jest odpowiednia wartość mocy zwarcia, niezbędna do zapewnienia prawidłowego i szybkiego procesu wytopu oraz utrzymania parametrów jakościowych energii elektrycznej, a zwłaszcza zawartości wyższych harmonicznych oraz wahań napięcia, w zakresie dopuszczalnych normatywnych wartości [16,17,18]. Do

skutecznych metod ograniczenia negatywnych skutków pracy pieców łukowych zalicza się stosowanie:

- filtrów pasywnych L-C,
- filtrów pasywnych L-C wspomaganých pracą nadążnego kompensatora mocy biernej indukcyjnej TCR jako układu SVC [6,12],
- układów STATCOM [1,7,16,18].

Urządzenia te spełniają równocześnie rolę układu kompensacji mocy biernej dla częstotliwości podstawowej. Nieliniowa charakterystyka napięciowo-prądowa łuku powoduje powstawanie silnych harmonicznych napięcia i prądu w EAF. W tym celu stosowane są technologie elastycznych systemów do transmisji prądu przemiennego FACTS (ang. *Flexible AC Transmission System*) [5,11], które ograniczają wahania napięcia oraz harmoniczne powodowane przez EAF. Najczęściej używanym urządzeniem FACTS w przypadku pieców łukowych jest kompensator SVC (ang. *Static Var Compensator*), który może zredukować wahania napięcia i harmoniczne do pewnego poziomu [6,11]. Opóźnienia związane z pomiarem mocy biernej i zapłonami tyrystorów zmniejszają możliwości kompensacyjne SVC. Aby zapobiec tym opóźnieniom, można zastosować układy STATCOM (ang. *Static Synchronous Compensator*), pozwalające na uzyskanie współczynnika redukcji migotania światła  $P_{lr}$  powyżej 5-krotnej wartości [4] oraz skuteczne tłumienie wyższych harmonicznych.

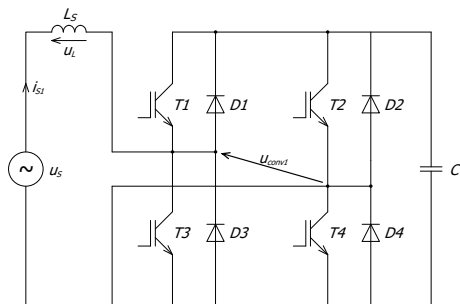
Istnieje wiele metod i topologii łączyeniowych tranzystorów IGBT stosowanych w aplikacjach technicznych STATCOM, opisanych w wielu monografiach [8,10,13] i publikacjach [2,15,16]. Najczęściej są one analizowane jako urządzenia współpracujące z piecami łukowymi AC w celu ograniczenia zjawiska migotania światła [2,15,16].

Wyposażenie instalacji linii zasilającej piec łukowy AC w urządzenia STATCOM (SVG) zapewnia nie tylko korzyści technologiczno-ekonomiczne, lecz także przyczynia się do istotnego ograniczenia degradacji jakości energii elektrycznej [4].

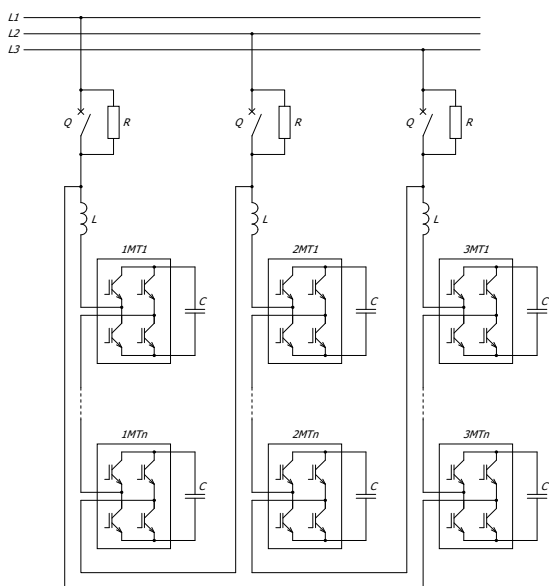
### Wielopoziomowe kompensatory MMC

Zasadniczym elementem filtru aktywnego SVG (STATCOM) jest jednofazowy moduł PM zbudowany

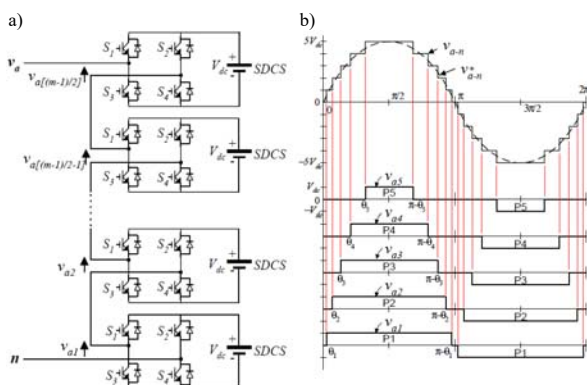
z czterech łączników tranzystorowych IGBT o topologii połączeń typu H (T1÷T4), obciążony baterią kondensatorów C, przedstawiony na rysunku 1. Sterowanie pracą tranzystorów mostka realizowane jest z wykorzystaniem metody PWM. Łącząc ze sobą n jednofazowych mostków mocy, uzyskuje się wielopoziomowy trójfazowy kompensator MMC (*ang. Modular Multilevel Converter VSC*), którego schemat przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 1. Schemat pojedynczego mostka PM konwertera MMC



Rys. 2. Topologia połączeń układu MMC



Rys. 3. Jednofazowa struktura wielopoziomowego inwertera kaskadowego z mostkiem typu H: a) schemat obwodu; b) przebiegi i sposób przełączania 11-poziomowego inwertera kaskadowego [9,17]

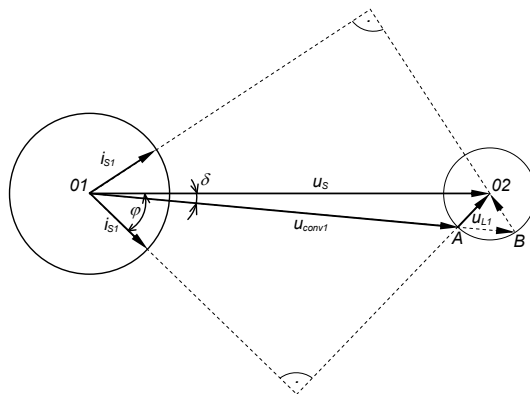
Do wstępnego naładowania kondensatorów C szeregowo połączonych mostków tranzystorowych podłączony jest rezystor R, który po krótkim czasie zostaje zwarty wyłącznikiem Q.

Jeśli pojedyncza gałąź fazowa układu VSC wyposażona byłaby tylko w dwa mostki PM ( $s = 2$ ), wówczas uzyskuje się pięć poziomów napięcia modulującego ( $m = 2s + 1$ ) [17]. W przypadku większej liczby mostków uzyskuje się bardzo dużą liczbę poziomów napięcia modulującego, co przedstawiono na rysunku 3 pochodzącym z publikacji [9,17].

Zastosowanie wielopoziomowego matrycowego inwertera pozwala na szybką reakcję kompensacji mocy, a także na eliminację odkształceń napięć w punkcie wspólnego przyłączenia, obniżając w sposób znakomity wskaźnik długookresowego migotania światła  $P_{lt}$ , o czym mogą świadczyć badania modelowe zaprezentowane w literaturze [2,14,15,16].

### Analiza dwukierunkowego przepływu mocy biernej

W analizie przepływu mocy czynnej i biernej pomocny jest wykres wskazowy zaprezentowany na rysunku 4. Między sinusoidalnym napięciem zasilania  $U_s$  a pierwszą harmoniczną napięcia mostka PM  $U_{conv1}$  występuje kąt przesunięcia fazowego  $\delta$ . Utworzony zostaje trójkąt napięć złożony z wektorów  $U_s$ ,  $U_{conv1}$  i  $U_{L1}$ , gdzie  $U_{L1}$  jest spadkiem pierwszej harmonicznej napięcia na dławiku  $L_s$ . Dla różnych wartości skutecznych napięć  $U_{conv1}$  miejscem geometrycznym jest okrąg o środku O2 i promieniu będącym napięciem  $U_{L1}$ . Można rozpatrywać dwa przypadki: 1) jeśli  $U_{conv1}/U_s = k_u < 1$  (punkt A) i 2) jeśli  $U_{conv1}/U_s = k_u > 1$  (punkt B). W pierwszym przypadku pierwsza harmoniczna prądu  $i_{s1}$  ma charakter indukcyjny (kąt:  $-\varphi$ ), natomiast w drugim przypadku pierwsza harmoniczna prądu  $i_{s1}$  ma charakter pojemnościowy (kąt:  $+\varphi$ ).



Rys. 4. Wykres wektorowy dla mostka PM - elementu układu MMC

Wartości mocy czynnej i biernej definiują dwie zależności określone w jako:

$$(1) \quad P = U_s \cdot i_{s1} \cdot \cos \varphi, \quad Q = U_s \cdot i_{s1} \cdot \sin \varphi$$

Z relacji geometrycznych podziału trójkąta O1AO2 na dwa trójkąty prostokątne wynikające z rzutu wektora  $U_{L1}$  na wektor  $U_s$  oraz prostego wyrażenia na wartość prądu  $i_{s1}$  otrzymuje się zależności wyrażone relacjami (2) i (3):

$$(2) \quad U_{L1} \cdot \cos \varphi = \omega \cdot L_s \cdot i_{s1} \cdot \cos \varphi = U_{conv1} \cdot \sin \delta$$

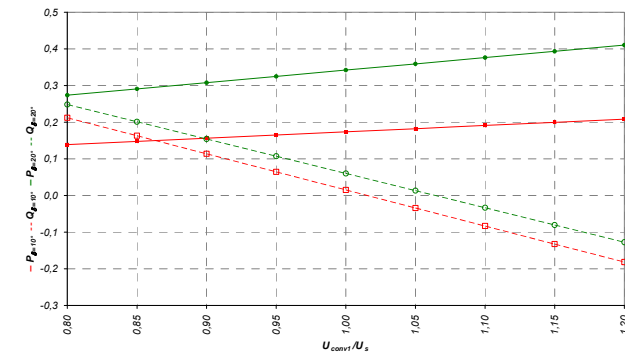
$$(3) \quad U_s - \omega \cdot L_s \cdot i_{s1} \cdot \sin \varphi = U_{conv1} \cdot \cos \delta$$

Podstawiając te zależności do wzorów (1) można uzyskać ostateczne zależności wyrażające wartości mocy czynnej (4) i biernej (5):

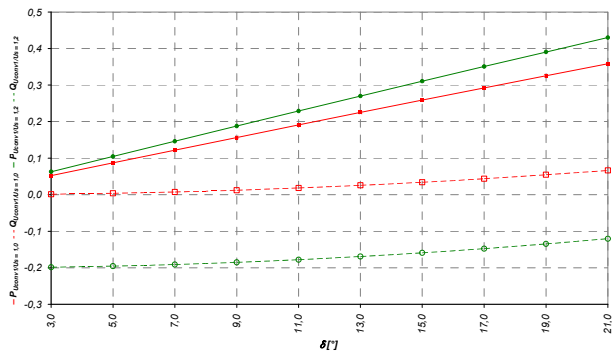
$$(4) \quad P = \frac{U_s^2}{\omega \cdot L_s} \left( \frac{U_{conv1}}{U_s} \cdot \sin \delta \right) = \frac{U_s^2}{\omega \cdot L_s} \cdot k_u \cdot \sin \delta$$

$$(5) \quad Q = \frac{U_s^2}{\omega \cdot L_s} \left( 1 - \frac{U_{conv1}}{U_s} \cdot \cos \delta \right) = \frac{U_s^2}{\omega \cdot L_s} (1 - k_u \cdot \cos \delta)$$

Ilustracje graficzne zmian mocy czynnej  $P(k_u, \delta)$  i bierniej  $Q(k_u, \delta)$  w zależności od współczynnika  $k_u = U_{conv1}/U_s$  oraz kąta  $\delta$  przedstawiono na rysunkach 5 i 6. Z wykresów tych wynika, że moc czynna  $P$  (4) w przedziale zmian  $0 < \delta < \pi/2$  jest zawsze dodatnia, natomiast moc bierna  $Q$  (5) zmienia swój znak w zależności od  $k_u$  i  $\delta$ , co świadczy o dwukierunkowym przepływie mocy bierniej.



Rys. 5. Wykres zmian mocy  $P$  i  $Q$  w zależności od  $k_u$  dla dwóch wartości kąta  $\delta = 10^\circ$  el. i  $\delta = 20^\circ$  el.



Rys. 6. Wykres zmian mocy  $P$  i  $Q$  w zależności od wartości kąta z zakresu  $3^\circ$  el.  $\leq \delta \leq 21^\circ$  el. i  $k_u = 1,0$  oraz  $k_u = 1,2$

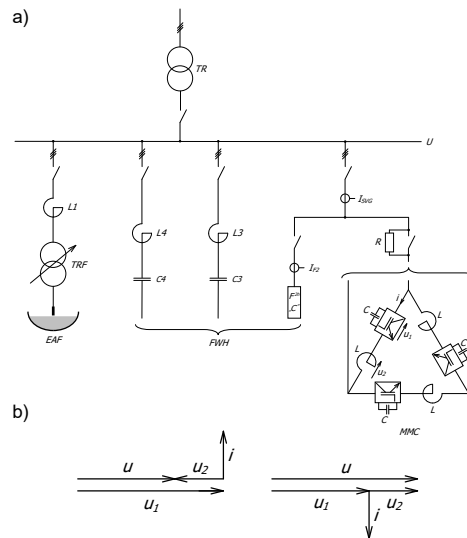
Rezultatem dwukierunkowego przepływu mocy bierniej jest zastosowanie wielopoziomowego trójfazowego kompensatora MMC (*ang. Modulator Multilevel VSC*) [3] - rysunek 2, zbudowanego z  $n$  jednofazowych mostków mocy PM. Włączenie trzech gałęzi połączonych w trójkąt do obwodu wtórnego transformatora sieciowego wraz z równoległymi filtrami wyższych harmonicznych (FWH) pozwala na pełną i szybką kompensację składowej bierniej prądu obciążenia. Oznaczając wartość napięcia strony wtórnej transformatora przez  $U_{2S}$  ( $L1$ ,  $L2$  i  $L3$  - rys. 2) oraz spadek napięcia  $U_L$  na reaktancji  $X = \omega L$ , można obliczyć wartość jednofazowej mocy bierniej pobieranej przez układ MMC:

$$(6) \quad Q = U_{2S} \frac{n \cdot U_{conv1} - U_{2S}}{\omega L}$$

### Współpraca układu MMC z piecem łukowym AC

Piec łukowy AC jest odbiornikiem o dużej jednostkowej mocy czynnej charakteryzującym się, szczególnie podczas fazy roztopiania złomu, bardzo chaotycznym poborem prądu co do wartości, kształtu oraz kąta przesunięcia jego pierwszej harmonicznej względem napięcia. Z uwagi na występowanie łuku elektrycznego o nieliniowej charakterystyce prądowo-napięciowej, czyni go odbiornikiem silnie zakłócającym sieć zasilającą, poprzez generację

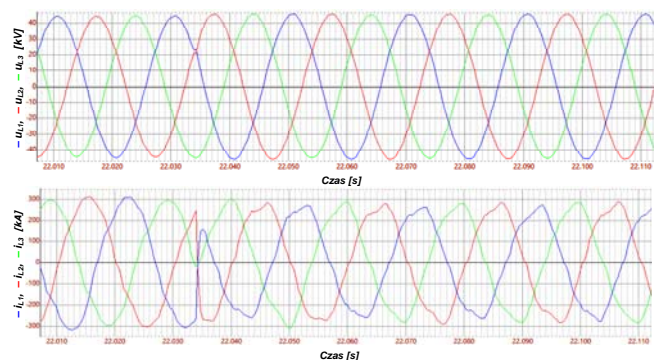
harmonicznych prądów fazowych o szerokim spektrum ich widma. Dla takich odbiorów szczególnie zalecana jest współpraca z energoelektronicznymi układami MMC oraz pasywnymi filtrami wyższych harmonicznych FWH. Przykładowy schemat zasilania pieca łukowego EAF z szeregowo włączonym dławikiem  $L1$  przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Schemat instalacji pieca łukowego AC wraz z zespołem filtrów wyższych harmonicznych (FWH) oraz układem MMC (a); wykresy wskazowe napięć i prądów:  $U$  - wskaz napięcia zasilającego,  $U_1$  - wskaz sumy napięć w gałęzi modułów PM układu MMC,  $U_2$  - wskaz spadku napięcia na dławiku  $L$ ,  $i$  - wskaz prądu gałęziowego układu MMC (b)

### Wyniki pomiarów

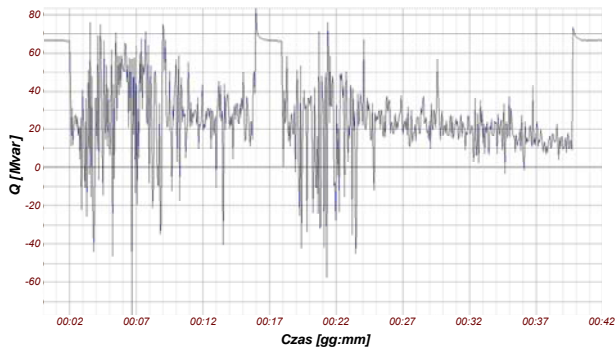
Zastosowanie filtra aktywnego SVG zbudowanego na bazie układu MMC pozwala na szybką reakcję w przepływie mocy bierniej pojemnościowej bądź indukcyjnej. Na podstawie wyników pomiaru prądu  $I_{SVG}$  (rys. 7) w chwili czasowej 20.034 (rys. 8) wyraźnie widać zmianę przesunięcia fazowych prądów fazowych  $I_{L1}$ ,  $I_{L2}$  i  $I_{L3}$  w odniesieniu do chwilowych napięć fazowych  $U_{L1}$ ,  $U_{L2}$  i  $U_{L3}$ , co potwierdza zmianę charakteru kompensacji z pojemnościowego na charakter indukcyjny.



Rys. 8. Przebiegi napięć i prądów fazowych podczas szybkiej zmiany charakteru kompensacji mocy bierniej

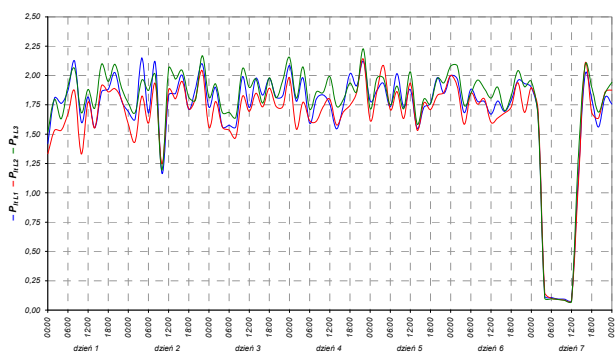
Pełny profil wytopu, przedstawiony na rysunku 9, obrazuje liczne zmiany charakteru (kierunku) przepływu mocy bierniej generowanej przez układ MMC.

W czasie przerwy w pracy pieca łukowego w przedziale 00:16+00:17:50, związanej z zasypaniem drugiego kosza złomowego, następuje generacja ok. 68 Mvar mocy bierniej indukcyjnej w celu skompensowania mocy bierniej pojemnościowej pochodzącej z filtrów wyższych harmonicznych FWH (rys. 7).

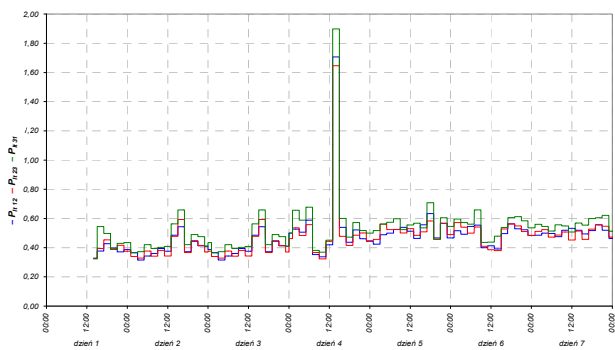


Rys. 9. Profil zmian charakteru mocy biernej generowanej przez układ MMC w pełnym cyklu wytopu stali

Redukcja wyższych harmoniczných prądów fazowych, szczególnie na etapie roztopiania złomu, powoduje znaczne obniżenie wskaźnika migotania światła. Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono wykresy zmian wskaźnika  $P_{it}$  podczas pełnego cyklu wytopu stali przy wyłączonym i załączonym układzie SVG.



Rys. 10. Wartości wskaźników  $P_{itL1}$ ,  $P_{itL2}$ ,  $P_{itL3}$  zarejestrowane na szynach stacji WN przed wdrożeniem układu MMC



Rys. 11. Wartości wskaźników  $P_{itL1}$ ,  $P_{itL2}$ ,  $P_{itL3}$  zarejestrowane na szynach stacji WN po wdrożeniu układu MMC

### Podsumowanie i wnioski

Wdrożenie układu MMC (SVG) zapewniło skuteczną redukcję wahań napięcia: wartości wskaźnika  $P_{it}$  zmniejszyły się z poziomu 1,9-2,0 do 0,65, ograniczając jednocześnie stopień odkształcenia napięć w punkcie wspólnego przyłączenia wyrażany miarą wartości wskaźnika THD  $U$  z 1,2% do 0,7%, a także pozwoliło na sztywne utrzymanie napięcia na szynach SN rozdzielni oraz ograniczenie asymetrii napięć.

Adaptacyjna praca układu SVG poprzez bardzo szybką zmianę z charakteru pojemnościowego na indukcyjny i odwrotnie zapewnia utrzymanie średniej wartości współczynnika  $\text{tg } \phi$  na poziomie 0,15.

**Autorzy:** dr inż. Marek Gała, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, ul. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, e-mail: [marek.gala@pcz.pl](mailto:marek.gala@pcz.pl); dr hab. inż. Kazimierz Jagiela, Częstochowski Oddział SEP, ul. Kopernika 16/18, 42-217 Częstochowa, e-mail: [kazimierz.jagiela@gmail.com](mailto:kazimierz.jagiela@gmail.com).

### LITERATURA

- [1] Chen J., Song S., Wang, Z., Analysis and implement of thyristor-based STATCOM, International Conference on Power System Technology 2006, 1-5
- [2] Das J.C., Transients in Electrical Systems. Analysis, Recognition and Mitigation, McGraw-Hill, New York, 2010
- [3] Gemell B., Dorn J., Retzmann D., Soerangr D., Prospects of multilevel VSC technologies for power transmission, 16, [http://www.ptd.siemens.de/IEEE\\_Multilevel\\_VSC.pdf](http://www.ptd.siemens.de/IEEE_Multilevel_VSC.pdf)
- [4] Grünbaum R., Haller J.-P., Owens A., Rasmussen J., STATCOM for Maintaining Power Quality in a Grid Feeding a Steel Plant, A Publication of the Association for Iron & Steel Technology, January, 2012, 38-46
- [5] Hingorani N.G., Gyugyi L., Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems, Wiley-IEEE Press, 2000
- [6] Jagiela K., Gała M., Rak J., Kepinski M., Szweczyk K., Analysis of Electric Energy Quality in Arc Furnace System with Follow-up SVC Compensation, 10th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation EPQU 2009, IEEE Conference Proceeding, 15-17 Sept. 2009, 1-5
- [7] Khederzadeh M., Coordination control of STATCOM and ULTC of power transformers, Universities Power Engineering Conference, 2007, 613-618
- [8] Kouro S., Malinowski M., Gopakumar K., Pou J., Franquelo L.G., Wu B., Rodriguez J., Perez M.A., Leon J.I., Recent Advances and Industrial Application of Multilevel Converters, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 57(8), 2553-2580
- [9] Leon M. Tolbert, Fang Z. Peng, Multilevel Converters as a Utility Interface for Renewable Energy Systems, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, July 15-20, 2000, Seattle, Washington, 1271-1274
- [10] Mohan N., Undeland T.M., Robins W.P., Power Electronics. Converters. Applications, and Design. John Wiley & Sons, Ltd., 2003
- [11] Padiyar K.R., FACTS Controllers in Power Transmission and Distribution, New Age International (P) Ltd., Publishers, New Delhi, 2007
- [12] Pereira M., Pieschel M., Stoeber R., Prospects of the new SVC with modular multilevel voltage source converter. CIGRE. SCB4 Colloquium, 2011, No. 25, 1-9
- [13] Rashid M.H., Power Electronics Handbook, Academic Press, 2001
- [14] Salimin R.H., Rahim M.S.A., Simulation Analysis of DVR Performance for Voltage Sag Mitigation. The 5th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO 2011), Shah Alam, Selangor, Malaysia 6-7 June 2011, 261-266
- [15] Samet H., Jarrahi M.A., A Comparison between SVC and STATCOM in Flicker Mitigation of Electric Arc Furnace using Practical Recorded Data, International Journal of Smart Electrical Engineering, Vol. 3, No. 4, 2014, 14
- [16] Selvi M.K., Lakshmi P. M., Rajeshwari M. M., Harmonic Mitigation using D-STATCOM for Electric Arc Furnace. International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering NCRICT, 2017, 36-40
- [17] Tolbert L.M., King T.J., Ozpineci B., Campbell J.B., Muralidharan G., Rzy D.T., Sabau A.S., Zhang H., Zhang W., Xu Y., Huq H.F., Liu H., Power Electronics for Distributed Energy Systems and Transmission and Distribution Applications. Prepared by the Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, December, 2005
- [18] Xi Z., Parkhideh B., Bhattacharya S., Improving distribution system performance with integrated STATCOM and super-capacitor energy storage system. Power Electronics Specialists Conference 2008, 1390-1395