

JAKOŚĆ ZASILANIA GWARANTOWANEGO W SYSTEMACH PODŁĄCZENIA ZASILANIA STATKÓW Z LĄDU CUMUJĄCYCH W PORCIE

QUALITY OF SUPPLY GUARANTEED IN SYSTEMS OF SHORE SUPPLY CONNECTION OF SHIPS MOORING IN A PORT

Dariusz TARNAPOWICZ
Akademia Morska w Szczecinie

Streszczenie: Zwiększony transport morski, przy ciągle rosnącym zapotrzebowaniu przez statki na energię elektryczną oznacza większą emisję zanieczyszczeń generowanych przez statki do atmosfery. W celu wyłączenia autonomicznych zespołów prądowców, które są głównym źródłem emisji zanieczyszczeń powietrza przez statki cumujące w porcie jest podłączenie statku do elektroenergetycznej sieci lądowej. Jakość energii elektrycznej dostarczanej z lądu ma ogromne znaczenie związane z bezpieczeństwem pracy systemów okrętowych i ekonomicznym funkcjonowaniem statku. Stosowane coraz powszechniej na statkach skomplikowane komputerowe systemy sterowania są bardzo wrażliwe na zaburzenia i wymagają zasilania o bardzo wysokiej jakości. W niniejszym artykule przedstawiono podstawowe informacje dotyczące jakości energii elektrycznej dostarczanej na statek z sieci lądowej oraz wybrane sposoby jej poprawy.

Słowa kluczowe: system „shore to ship”, jakość energii elektrycznej, współczynnik zawartości harmonicznych, przekształcanie energii elektrycznej

1. WSTĘP

Na całym świecie zwiększa się zainteresowanie sposobami ograniczenia negatywnego wpływu statków cumujących w portach na środowisko naturalne. Konieczne staje się poszukiwanie rozwiązań tego problemu.

Głównym źródłem emisji zanieczyszczeń powietrza przez statki cumujące w porcie są okrętowe zespoły prądowców Diesel-Generator.

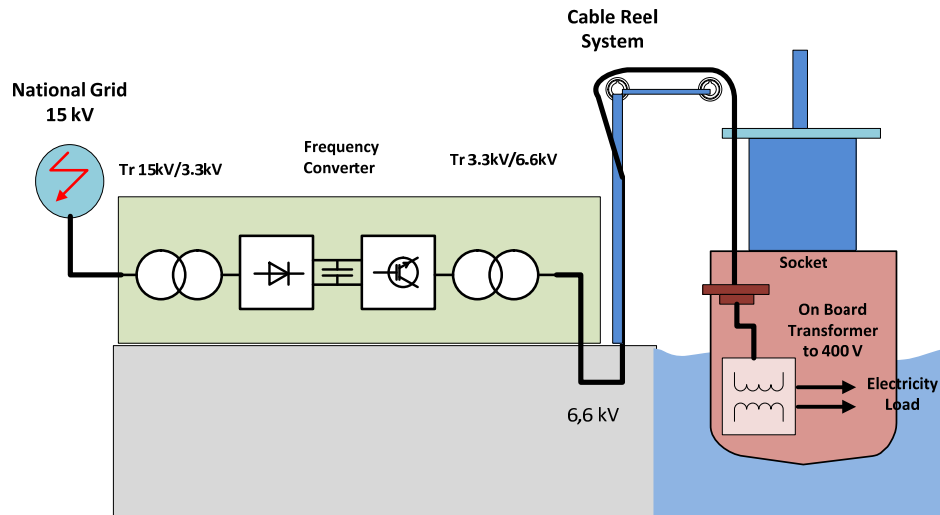
Energia elektryczna w większości przypadków jest dostarczana z autonomicznych zespołów prądowców (AE) składających się z tłokowego silnika spalinowego i generatora synchronicznego. Badania emisji spalin przeprowadzone w portach oraz ich otoczeniu prowadzą do wniosku, że statki morskie są głównym źródłem emisji spalin takich jak; tlenku azotu (NO_x), dwutlenku siarki (SO₂) i cząstki stałe (PM) [1]. Emisja zanieczyszczeń z źródeł lądowych (zakłady przemysłowe, samochody, pociągi), została drastycznie zmniejszona w ciągu ostatnich dwóch dekadach poprzez wdrażanie rygorystycznych norm emisji spalin, stosowanie czystych paliw i instalacji urządzeń ograniczających emisję zanieczyszczeń. Zanieczyszczenie generowane przez statki cumujące w portach jest nie do zaakceptowania. Wykorzystanie przez statki cumujące w portach energii elektrycznej z sieci lądowej pozwala na wyłączenie autonomicznych zespołów prądowców ograniczając przez to w znacznym stopniu emisję zanieczyszczeń powietrza.

Problem techniczny tego rozwiązania jest związany ze stosowaniem na statkach sieci elektrycznych o różnych parametrach znamionowych, jak również brakiem normalizacji parametrów elektroenergetycznych sieci lądowych na świecie [2]. Dopasowanie poziomów napięć sieci lądowej z elektroenergetyczną siecią okrętową jest realizowane za pomocą transformatorów sieciowych. Główny problem stanowi dopasowanie częstotliwości. W okrętowych sieciach elektroenergetycznych występują napięcia o częstotliwości 60 Hz (ok 65% statków) i 50 Hz (ok 35% statków). Częstotliwość sieci lądowych jest zależna od rejonów świata i wynosi przeważnie 50 Hz w Europie, Afryce, znacznej części Azji oraz na

kontynencie amerykańskim 60 Hz. W celu dopasowania częstotliwości sieci okrętowych i lądowych stosowane są przemienniki częstotliwości.

Zapewnienie pełnej zgodności pomiędzy elektryczną siecią okrętową, a lądową stało się priorytetem. Międzynarodowa standaryzacja systemu pozwala na uniwersalność stosowania systemu, czyli umożliwia budowę systemu pozwalającego na korzystanie z podłączenia z lądem dla większości typów statków. W lipcu 2012 opublikowano dokument IEC/ISO/IEEE 80005-1 [3]. Dokument ten opisuje systemy HVSC, na pokładzie statku i na lądzie, tak aby była możliwe dostarczenie na statek energii elektrycznej z lądu.

Na rysunku 1 przedstawiona jest konfiguracja systemu Shore To Ship (STS) – elektroenergetycznego podłączenia statku z lądem oparta na założeniach opracowanych przez IEC¹.



Rys. 1. Schemat zasilania energoelektrycznego statku (STS) w oparciu o IEC

Jakość energii elektrycznej dostarczanej z lądu na statek ma ogromne znaczenie związane z bezpieczeństwem pracy systemów okrętowych i ekonomicznym funkcjonowaniem statku.

2. JAKOŚĆ ENERGII ELEKTRYCZNEJ W SYSTEMACH STS

Jakość energii elektrycznej można zdefiniować jako zbiór parametrów opisujących właściwości procesu dostarczania energii elektrycznej, określających bezprzerwowość zasilania oraz charakteryzujących napięcie [4, 5]. Do opisu jakości energii elektrycznej służą parametry jakościowe, które można podzielić na dwie grupy: parametry związane z ciągłością zasilania i z odkształceniem napięcia względem podstawowej harmonicznej. Podstawowymi parametrami jakościowymi są:

- wahania napięcia
- odkształcenia napięcia
- asymetria napięć
- długotrwałe i krótkotrwałe obniżenia i wzrosty napięcia
- uskoki (zapady) napięcia
- długotrwałe i krótkotrwałe blackout
- przepięcia

Chwilowe pogorszenie się jakości energii elektrycznej ma szczególne znaczenie dla bezpieczeństwa pracy okrętowych systemów technicznych, natomiast długotrwałe

¹ International Electrotechnical Commission

pogorszenie jakości wiąże się przede wszystkim z kosztami ekonomicznymi [6]. Odbiorniki energii elektrycznej na statku są bardzo czułe na zmiany napięcia zasilającego – jego odchylenia od wartości znamionowych.

Odkształcenie napięcia ma wpływ na:

- pracę silników elektrycznych (elektromagnetyczne momenty pasożytnicze, przegrzanie oraz trwałe uszkodzenia łożysk),
- odbiorników oświetleniowych (migotanie światła),
- przewody elektryczne (starty mocy czynnej, spadki napięcia),
- aparatura kontrolno-pomiarowa („fałszywe” alarmy, niekontrolowane wyłączenia)
- Wahania napięcia mają wpływ na:
 - pracę silników elektrycznych (zmiana momentu elektromagnetycznego, zużywanie się części silnika i urządzenia napędzanego),
 - odbiorników oświetleniowych (zmiana skuteczności świetlnej),
 - urządzenia energoelektroniczne (uszkodzenia zaworów),
 - styczniki i przekaźniki (iskwienie się styków, niekontrolowane wyłączanie się)
- Odchylenia napięcia mają wpływ na:
 - pracę silników elektrycznych (przetężenia, przyrost temperatury, trudności podczas rozruchu
 - odbiorników oświetleniowych (zmniejszenie trwałości lamp wyładowczych)
 - grzejniki (zmniejszenie wydajności, szybsze zużycie)

Pogorszenie się parametrów jakości energii elektrycznej w systemach STS jest związane zarówno z siecią zasilającą (przede wszystkim nieliniową charakterystykę prądowo-czasową elementów półprzewodnikowych przekształtnika częstotliwości) jak i z nieliniowymi odbiorami energii elektrycznej na statku. Niezbędne jest zastosowanie metod poprawy jakości energii elektrycznej zasilającej urządzenia okrętowe. W artykule przedstawione są wybrane sposoby jej poprawy.

3. ODKSZTAŁCENIE NAPIĘCIA

Zniekształcenia napięcia dla sieci elektroenergetycznych określa się za pomocą wskaźnika zawartości harmonicznych THD – total harmonic distortion. Napięciowy wskaźnik zawartości harmonicznych przedstawia następująca zależność (1) [6]:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{30} U_h^2}}{U_1} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:

U_1 – skuteczna wartość napięcia składowej podstawowej,

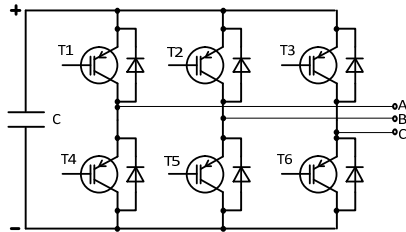
U_h – skuteczna wartość napięcia h-tej harmonicznej.

W związku z wysokim nasyceniem systemów okrętowych skomplikowaną i wrażliwą na zakłócenia napięcia automatyką występuje tendencja do ograniczania THD_U do 5% (np. Lloyd's Register of Shipping < 5%).

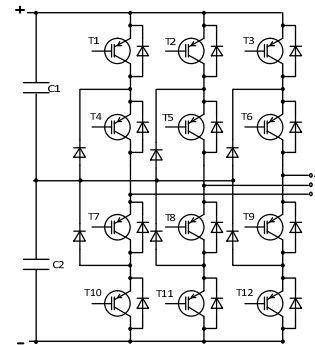
W układzie STS ważnym źródłem powstawania wyższych harmonicznych w przebiegach napięć zasilających jest falownik w układzie przekształtnika częstotliwości. Dla ograniczenia wyższych harmonicznych powszechnie stosowane są:

- filtry pasywne – obwody LC włączone równolegle dobrane na wybrane harmoniczne (wymagane jest często włączenie kilku filtrów)
- filtry aktywne – układy falownikowe włączone szeregowo (filtracja napięcia) lub równolegle (filtracja prądu)
- filtry hybrydowe – zainstalowanie jednocześnie filtra pasywnego i aktywnego.

W artykule zaproponowano inny sposób ograniczenia wyższych harmonicznych – falownik wielopoziomowy. Moc klasycznych przekształtników tranzystorowych dwupoziomowych zbudowanych w oparciu o tranzystory IGBT jest ograniczona względami technologicznymi.



Rys. 2a. Topologia falownika 3-fazowego dwupoziomowego



Rys. 2b. Topologia falownika 3-fazowego pięciopoziomowego

Tranzystory IGBT zabezpieczają komutację prądów do 1,8 kA i budowane są na maksymalne napięcia do 4,5 kV. Zastosowanie dla układów tranzystorowych wielopoziomowych pozwala obniżyć wymagania odnośnie klasy napięciowej łączników. Obecnie w układach falowników wielopoziomowych najbardziej popularnym jest falownik z punktem neutralnym zasilania NPC (neutral-point clamped inverter). Topologia falownika NPC oparta jest na podziale napięcia obwodu pośredniczącego na trzy lub więcej stopni z wykorzystaniem dzielnika pojemnościowego. Biegun zerowy napięcia zasilania „N” jest punktem odniesienia wyjściowych napięć fazowych. Na rysunku 2 przedstawiona jest topologia falownika dwupoziomowego (rys 2a) i pięciopoziomowego NPC (rys. 2b).

Na rysunku 3a i 3b przedstawione są przebiegi w układzie falownika klasycznego (dwupoziomowego) pięciopoziomowego i uzyskane w badaniach symulacyjnych z wykorzystaniem programu MATLAB. Badania zostały wykonane dla tych samych parametrów falownika (napięcie pośredniczące, częstotliwość próbkowania, indukcyjność wyjściowa falownika). Przebiegi przedstawione są dla jednej fazy napięcia.

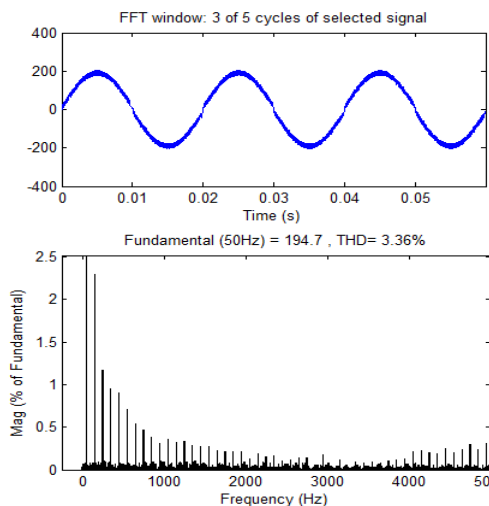


Fig. 3a. Przebieg czasowy napięcia oraz harmoniczne napięcia dla falownika dwupoziomowego

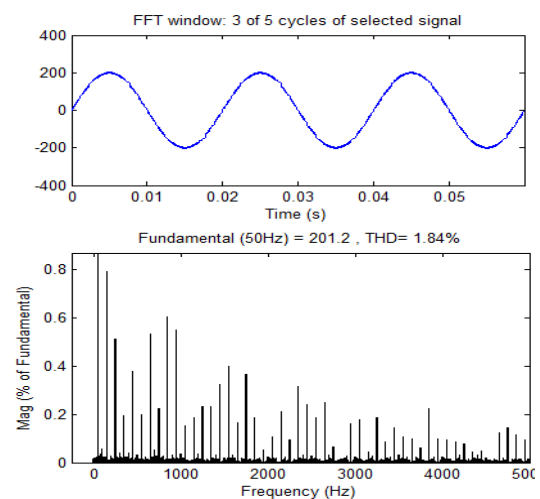


Fig. 3b. Przebieg czasowy napięcia oraz harmoniczne napięcia dla falownika pięciopoziomowego

Wyniki badań wykazują poprawę jakości napięć zasilających wraz ze wzrostem poziomów falownika (dla 2-poziomowego THD=3,36%, a dla 5-poziomowego THD=1,84%).

4. NIESYMETRIA NAPIĘĆ

Głównym powodem powstawania niesymetrii napięć trójfazowych jest asymetryczne obciążenie w poszczególnych fazach. Odbiorniki w sieciach okrętowych są traktowane jako symetryczne, co nie jest do końca prawdą. Na statkach są instalowane dużej mocy odbiorniki niesymetryczne. Ważną grupę stanowią tu grzejniki zbiorników i systemów, często pracujące jako dwufazowe. Niesymetria obciążenia może być znaczna oraz zmienna w czasie. Brak symetrii napięcia zasilającego powoduje przede wszystkim dodatkowe straty energii w silnikach asynchronicznych klatkowych co może powodować wzrost temperatury i przegrzanie.

W systemie STS asymetria napięć ma szczególne znaczenie wtedy, gdy jeden przekształtnik częstotliwości zasila kilka statków w porcie. W artykule przedstawiony został sposób poprawy niesymetrii z wykorzystaniem równoległego filtra aktywnego (SAF).

Całkowita moc pozorna (S) jest geometryczną sumą mocy czynnej P, mocy biernej Q i mocy niesymetrii D (2) [7]:

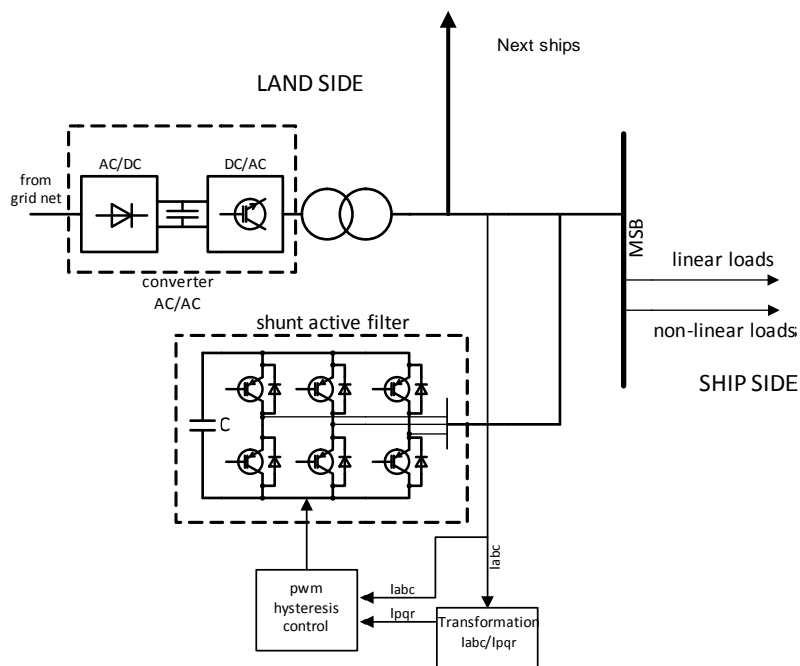
$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (2)$$

Zadaniem filtra aktywnego SAF jest generowanie nieaktywnych składników prądów do sieci elektrycznej. Dzięki odpowiedniej transformacji współrzędnych trójfazowych można wyznaczyć składniki aktywnych prądów obciążenia, a w rezultacie kompensacji nieaktywnych składników prądu. W układach sterowania falowników powszechnie stosowane jest przekształcenie wielkości chwilowych trójfazowych a, b, c (napięć lub prądów) do równoważnego wirującego układu kartezjańskiego dwufazowego d, q, 0 [8, 9]. Stosowanie transformaty Parka prowadzi do błędów wyznaczanie składowej czynnej prądu w przypadku asymetrii prądów. Błąd może być wyeliminowane przy pomocy obracającego się układu trzech współrzędnych p, q, r [10]. Transformacja układu współrzędnych d, q, 0 układu współrzędnych p, q, r odbywa się zgodnie z równaniem (3):

$$\begin{bmatrix} u_p \\ u_q \\ u_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{u_d}{u_{d0}} & 0 & \frac{u_0}{u_{d0}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\frac{u_0}{u_{d0}} & 0 & \frac{u_d}{u_{d0}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

gdzie:

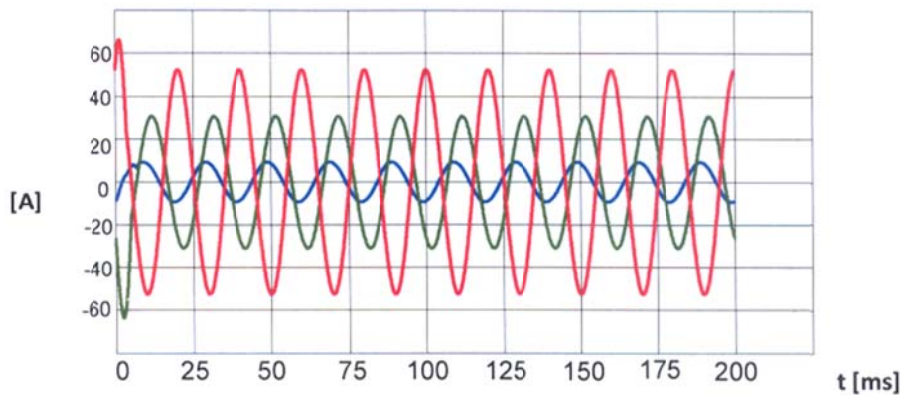
$$u_{d0} = \sqrt{u_d^2 + u_0^2}$$



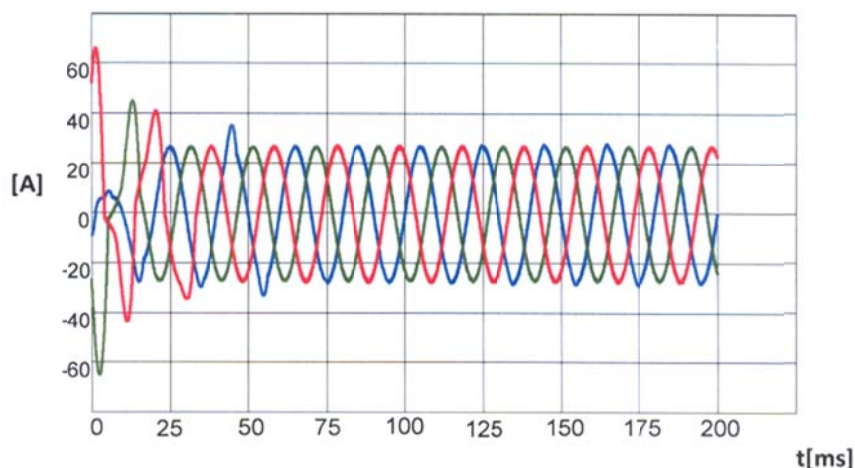
Rys. 4. System STS z filtrem SAF

Schemat ideowy układu systemu STS z filtrem SAF eliminującym niesymetrię prądów obciążenia przedstawiony jest na rysunku 4.

Przedstawiony na rys. 4 układ, został zaimplementowany w programie symulacyjnym MATLAB-SIMULINK. Wyniki badań przedstawia rysunek 5 oraz 6.



Rys. 5. Przebiegi prądów w sieci STS przy asymetrii obciążenia



Rys. 6. Przebiegi prądów w sieci STS przy asymetrii obciążenia z zastosowaniem filtra SAF

5. WNIOSKI

Jakość energii elektrycznej dostarczanej na statki w systemach STS jest związana z przede wszystkim z bezpieczeństwem pracy systemów okrętowych. Najbardziej zagrożone złą jakością energii elektrycznej są powszechnie używane urządzenia kontrolne i sterujące. Zaproponowane w artykule wybrane metody poprawy jakości energii elektrycznej pozwalają na poprawę bezpieczeństwa i ekonomiki.

Zastosowanie falowników wielopoziomowych w układzie STS znacząco poprawia THD napięć zasilających, jednocześnie zwiększając klasę napięciową przemienników częstotliwości.

Zastosowanie w systemach STS filtrów SAF pozwala niwelować asymetrię prądów wyjściowych przemiennika, a co za tym idzie poprawić parametr jakości energii elektrycznej jakim jest asymetria napięć.

6. LITERATURA

- [1] Tarnapowicz D., Borkowski T., Nicewicz G.: Ships moored in the port with threat to the natural environment. *Management Systems in Production Engineering* 2012/2.
- [2] Tarnapowicz D.: An alternative power supply: the use of ships in port as an environmentally friendly solution. *Management Systems in Production Engineering* 2011/3.
- [3] International Electrotechnical Commission, IEC/ISO/IEEE 80005-1 pt.: INTERNATIONAL STANDARD Utility connections in port – Part 1: High Voltage Shore Connection (HVSC) Systems – General requirements Edition 1.0 2012-07.
- [4] Hanzelka Z. Jakość Energii Elektrycznej. *Elektroinstalator* nr 9/2001.
- [5] European Commission: Amended proposal for a European Parliament and Council Directive concerning common rules for the internal market in electricity. *Official Journal of European Communities*, no C 123, 4.5.94.
- [6] Mindykowski J. Tarasiuk T. Jakość energii elektrycznej a ekonomiczna eksploatacja okrętowych systemów technicznych. *Jakość energii elektrycznej Tom IV Zeszyt 2 Rok 1998*.
- [7] Czarnecki Leszek S.: Instantaneous Reactive Power p-q Theory and Power Properties of Three-Phase Systems *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21, No.1, Jan. 2006, pp. 362-367.
- [8] Akagi H. et al.: Generalized theory of instantaneous reactive power in three-phase circuits. *Conf. Rec. IPEC'83, Tokyo, 1993*, pp.1375-1386.

- [9] Park R.: Two reaction theory of synchronous machines, AIEE Transactions, vol. 48, pp. 716–730, 1929.
- [10] Kim H, Blaabjerg F., Back-Jensen B.: "Instantaneous power compensation in three – phase systems using p-q-r theory" – IEEE Trans. – Power Electronics, vol.17, no 5. 2002.