

Jakub FURGAŁ

ANALIZA WYŻSZYCH HARMONICZNYCH W SIECI Z PRACUJĄCYMI ELEKTROWNIAMI WIATROWYMI

STRESZCZENIE Nowoczesne turbiny wiatrowe wyposażane są w energoelektroniczne układy do konwersji energii. Urządzenia te są źródłem prądów harmoniczných, które przepływając przez elementy sieci powodują odkształcenia napięcia. Podstawą analizy harmoniczných w systemie jest wyznaczenie impedancji harmonicznej systemu. W tym celu buduje się model sieci energetycznej dla wyższych częstotliwości. Istnieją również metody bezpośredniego pomiaru tej impedancji. Producent turbiny podaje informacje na temat zawartości poszczególnych harmoniczných w prądzie wyjściowym turbiny. Na podstawie wyznaczonej charakterystyki impedancji wejściowej systemu oraz informacji podanych przez producenta jesteśmy w stanie określić napięcie poszczególnych harmoniczných w punkcie przyłączenia elektrowni wiatrowej do sieci.

Słowa kluczowe: analiza harmoniczných, elektrownie wiatrowe, jakość energii, impedancja harmoniczna

1. WSTĘP

Na przestrzeni ostatnich lat obserwowany jest bardzo dynamiczny rozwój energetyki wiatrowej, co przejawia się wykładniczym wzrostem mocy zainstalowanej w tego typu elektrowniach. W niektórych krajach europejskich moc ta

mgr inż. Jakub FURGAŁ

e-mail: vipkuba@o2.pl

Politechnika Lubelska, PGE LUBZEL Dystrybucja Sp. z o.o.

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 236, 2008

przekroczyła w ubiegłym roku poziom 30% całkowitej mocy zainstalowanej w systemie. Jednocześnie mamy do czynienia z wprowadzaniem na rynek coraz bardziej wydajnych rozwiązań turbin. Siłownie wiatrowe praktycznie nie emitują żadnych szkodliwych substancji do środowiska naturalnego, co daje im niewątpliwą przewagę w porównaniu z elektrowniami konwencjonalnymi. Powodują one jednak szereg problemów związanych z jakością energii wprowadzanej do sieci.

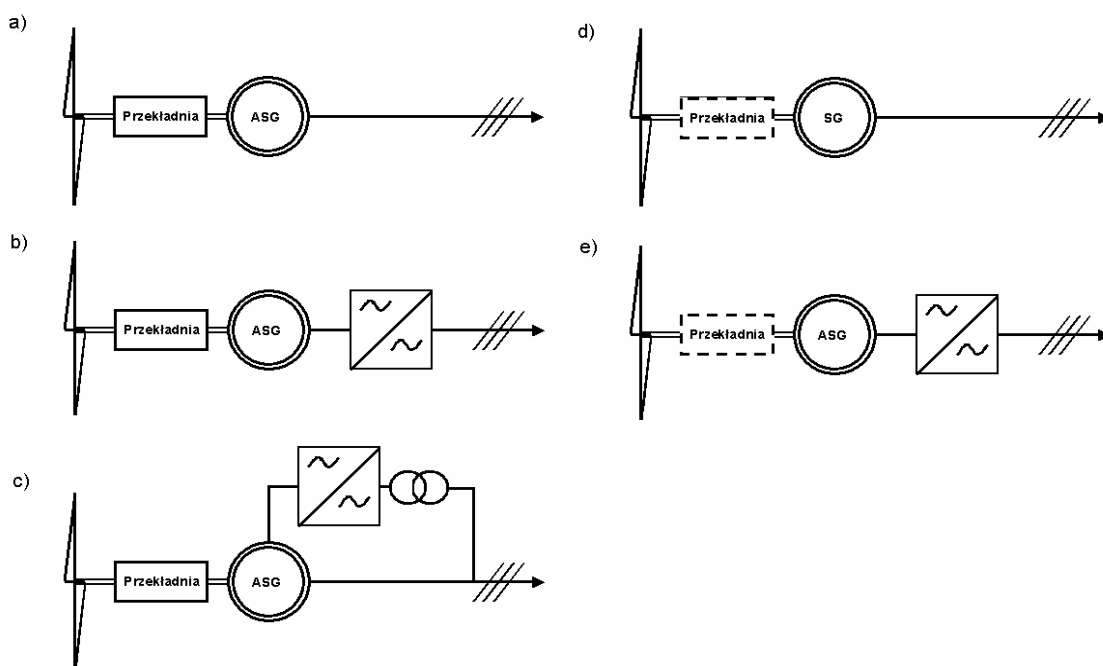
Turbogeneratory pracujące w jednostkach energetyki zawodowej to urządzenia synchroniczne przyłączone za pośrednictwem transformatorów blokowych do sieci WN i NN. Napięcie w punkcie przyłączenia takiego generatora do sieci jest sinusoidalne i pozbawione harmonicznych. Jeżeli do takiego systemu podłączymy odbiory liniowe, to krzywa napięcia w każdym punkcie sieci jest idealnie sinusoidalna. Taki wyidealizowany stan systemu właściwie nie ma nigdy odzwierciedlenia w praktyce. Następuje ciągły wzrost mocy pobieranej z sieci przez odbiorniki nieliniowe takie jak: zasilacze impulsowe w sprzęcie biurowym, indukcyjne urządzenia grzewcze, wyładowcze źródła światła, układy prostownikowe, układy awaryjnego zasilania UPS, spawarki itd.. Przepływ przez elementy sieci (transformatory, linie) odkształconego prądu zasilającego odbiorniki nieliniowe powoduje odkształcenie napięcia. Przyłączanie do systemu elektroenergetycznego turbin wiatrowych, o znacznych mocach (sprężonych z siecią za pośrednictwem urządzeń energoelektronicznych) powoduje dodatkowe zanieczyszczenie sieci od strony zasilania i może doprowadzić do odkształcenia napięcia przekraczającego limity określone w aktach prawnych.

Zasadniczy wpływ na poziom harmonicznych mają układy wykonawcze w przekształtniku energoelektronicznym turbiny. Układy tyrystorowe są konkurencyjne cenowo ale emitują dużą zawartość harmonicznych nieparzystych zwłaszcza piątego i siódmego rzędu. Zastąpienie tyrystorów modułami IGBT, które mogą być sterowane z wykorzystaniem modulacji szerokości impulsu (PWM) ogranicza w znacznym stopniu problem związany z harmonicznymi.

2. WPŁYW UKŁADU WSPÓŁPRACY TURBINY WIATROWEJ Z SIECIĄ NA POZIOM ZNIEKSZTAŁCENÍ HARMONICZNYCH

We współczesnej energetyce wiatrowe obserwowana jest ewolucja konstrukcji turbin wiatrowych i generatorów a także sposobu ich podłączenia do sieci. Stosowane początkowo proste układy wykorzystujące generatory indukcyjne klatkowe stopniowo zastępuje się coraz bardziej wydajnymi a jednocześnie bardziej skomplikowanymi konstrukcjami. Dużą rolę w tych

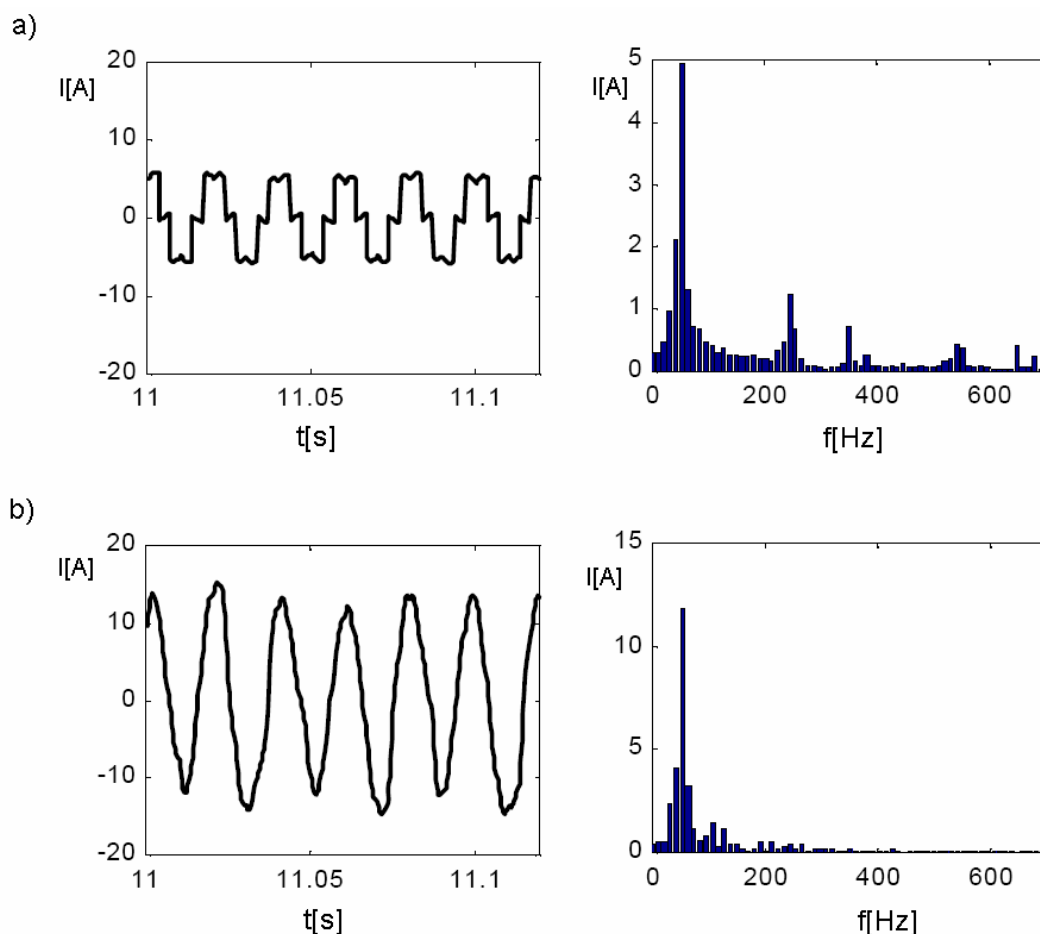
przemianach odgrywa rozwój energoelektroniki umożliwiającą budowanie coraz bardziej elastycznych, a co za tym idzie efektywniejszych elektrowni wiatrowych. Niestety pociąga to za sobą konsekwencje w postaci pogorszenia jakości energii wprowadzanej do sieci głównie na skutek odkształceń harmonicznych.



Rys. 1. Układy współpracy elektrowni wiatrowej z siecią:

a) generator asynchroniczny bezpośrednio sprzężony z siecią, b) generator asynchroniczny sprzężony z siecią przez przekształtnik energoelektroniczny c) podwójnie zasilany generator asynchroniczny d) generator synchroniczny bezpośrednio sprzężony z siecią e) generator synchroniczny sprzężony z siecią przez przekształtnik energoelektroniczny

Generator synchroniczny i asynchroniczny bezpośrednio sprzężony z siecią nie generuje harmonicznych. Poza tym należy zauważyć, że maszyny te, dla pewnych częstotliwości zmniejszają impedancję zwarciovą sieci i tym samym przyczyniają się do zmniejszenia zawartości wyższych harmonicznych w napięciach. Wyjątek stanowią turbiny w których zastosowano energoelektroniczne układy typu soft-start do łagodnego rozruchu. W czasie rozruchu układy soft-start wprowadzają znaczne zniekształcenia prądu, jednak po starcie turbiny są one bocznikowane przez wyłącznik i wyłączane. Z reguły więc ich wpływ na sieć jest pomijany. Stosunkowo wysoki poziom zniekształceń wprowadzają prądnice asynchroniczne zasilane podwójnie. Odkształcony prąd płynący przez przekształtnik energoelektroniczny zainstalowany w obwodzie wirnika takiej maszyny płynie razem z prądem indukowanym w uzwojeniach do sieci zasilającej powodując odkształcenia napięcia na jej elementach.

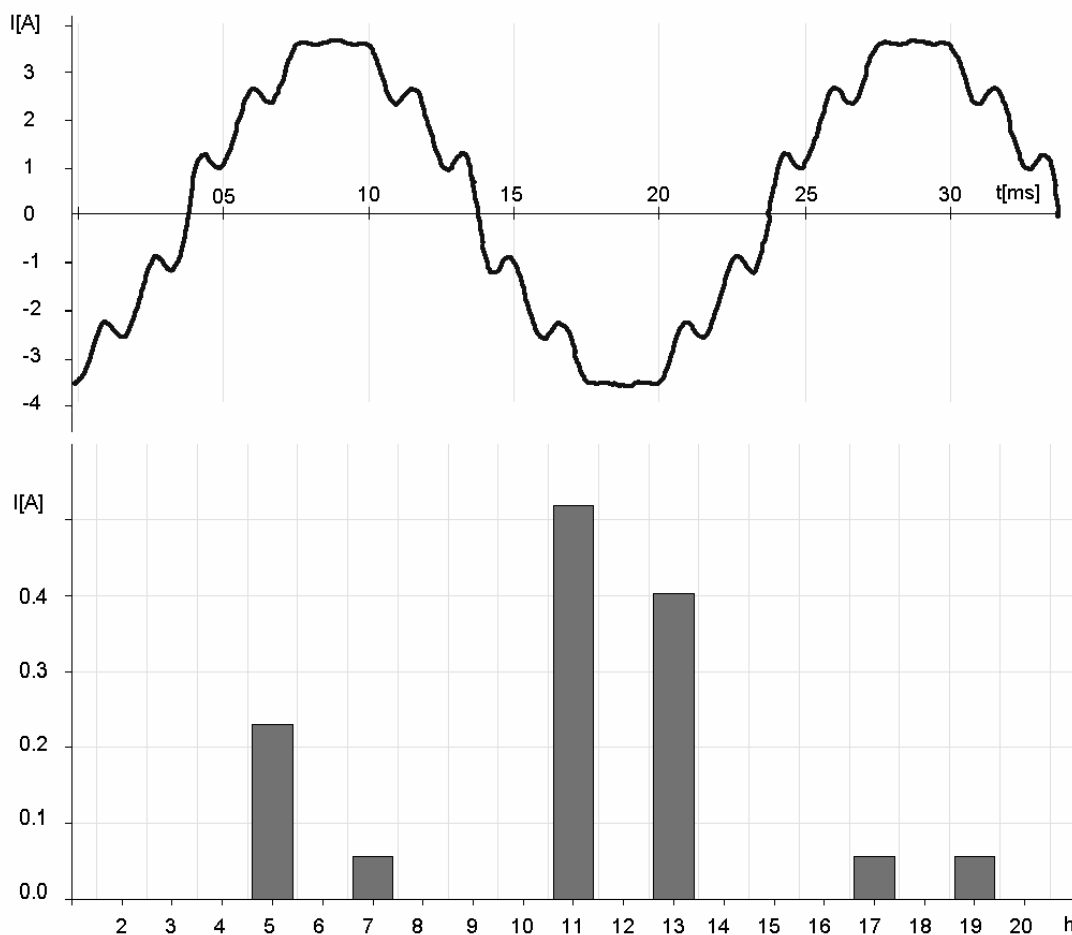


Rys. 2. Odształcenia prądu w obwodzie generatora indukcyjnego zasilanego podwójnie: a) przebieg czasowy i spektrum harmonicznych prądu płynącego z przekształtnika, b) przebieg czasowy i spektrum harmonicznych prądu wyjściowego na zaciskach generatora [1]

Na rysunku 2 a) odzwierciedlony jest przebieg prądu płynącego od strony wirnika maszyny asynchronicznej w kierunku sieci zasilającej. Spektrum prądu takiego generatora zawiera duże ilości harmonicznych i subharmonicznych niskiego rzędu oraz harmonicznych odpowiadających częstotliwości 250 i 350 [Hz]. Część prądów wielkiej częstotliwości zamyka się w obwodzie stojana takiego generatora, a część płynie do sieci co powoduje odształcenie napięcia w punkcie przyłączenia do sieci.

Generatory indukcyjne synchroniczne są maszynami, które bezpośrednio przyłączone do sieci mogą pracować wyłącznie ze stałą prędkością obrotową. Generator indukcyjny pracujący w takim samym układzie może zmieniać prędkość wirowania w nieznacznych granicach określonych poślizgiem. Turbina wiatrowa natomiast uzyskuje największą sprawność przemiany energii wiatru w energię ruchu obrotowego przy zmiennej prędkości obrotowej. Z tego powodu w elektrowniach wiatrowych zaczęto stosować elektroenergetyczne przemienniki częstotliwości. Układy te mają wiele zalet ale prąd płynący do sieci po stronie wtórnej przekształtnika jest silnie odształcony. Najbardziej widoczne

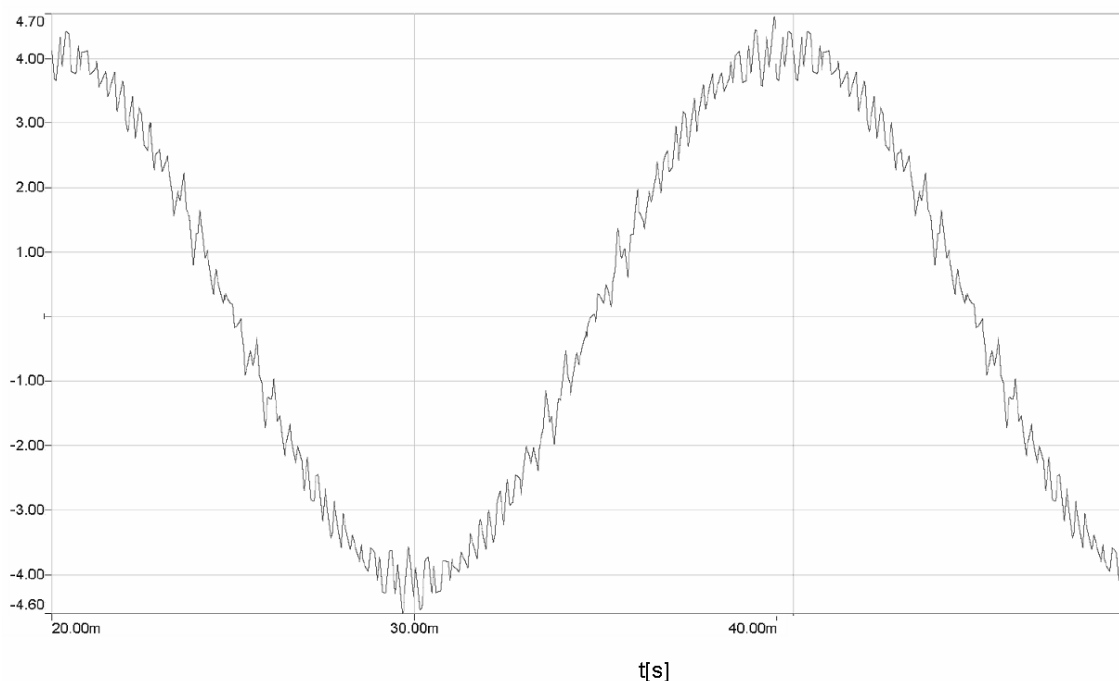
jest to w spektrum harmonicznych pierwszych rozwiązań konwerterów wykorzystujących przekształtniki komutowane sieciowo zbudowane w oparciu o półsterowalne elementy półprzewodnikowe - tyrystory.



Rys. 3. Przebieg czasowy prądu oraz spektrum harmonicznych przekształtnika tyrystorowego dwunastopulsowego

Dla spełnienia obowiązujących przepisów regulujących poziom harmonicznych w sieci, konieczne jest dołączenie na wyjściu konwerterów tyrystorowych odpowiednich filtrów. Dodatkową wadą tych układów jest praca ze stosunkowo niskim współczynnikiem mocy.

Nowoczesne przekształtniki energoelektroniczne są budowane na bazie w pełni sterowalnych zaworów energoelektronicznych - tranzystorów IGBT [2]. Układy te pracują przy częstotliwościach rzędu kilku kiloherców dzięki czemu eliminowane są harmoniczne niższych rzędów. Dla przekształtników budowanych w oparciu o tranzystory IGBT pojawiają się harmoniczne o częstotliwościach zbliżonych do częstotliwości przełączania zaworów, czyli 2 do 6 kHz. Tak wysokie częstotliwości są jednak łatwe do odfiltrowania.



Rys. 4. Kształt fali prądowej konwertera z tranzystorami IGBT bez filtracji

3. MODELOWANIE SYSTEMU DLA PRĄDÓW WYŻSZYCH CZĘSTOTLIWOŚCI

Ze względu na szkodliwe oddziaływanie odkształceń zarówno na elementy systemu elektroenergetycznego jak i odbiorniki przyłączone do sieci w unormowaniach prawnych zawarte są zapisy regulujące kwestię harmonicznych. Wartości dopuszczalne dla farm wiatrowych przyłączonych do sieci podane są w normie IEC 61000-3-6 a sposób ich obliczania w IEC 61000 - 21. W Polsce parametry jakościowe energii dla źródeł przyłączanych do sieci określa Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 20 grudnia 2004 r. Na podstawie zaleceń norm IEC oraz rozporządzenia operatorzy systemu przesyłowego i dystrybucyjnego w Instrukcjach Ruchu i Eksploatacji określają wymagania dla elektrowni przyłączanych do swoich sieci [3]. Wymagania te wymuszają na inwestorach konieczność przeprowadzania analizy wpływu nowych jednostek na jakość napięcia w punkcie przyłączenia już na etapie projektowym. Z tego powodu konieczne staje się modelowanie fragmentu systemu elektroenergetycznego w okolicy miejsca przyłączenia elektrowni co umożliwi określenie poziomu zniekształceń harmonicznych napięcia.

Przeprowadzanie szczegółowych analiz harmonicznych w rzeczywistym systemie elektroenergetycznym z pracującymi elektrowniami wiatrowymi jest

zagadnieniem bardzo skomplikowanym. Wiąże się to z zawansowanymi modelami dla wszystkich elementów systemu włącznie z obciążeniami odbiorców które cechuje duża losowość. Dlatego w praktyce stosowane są uproszczone metody bazujące na kilku założeniach:

- źródła harmonicznych są modelowane jako prądy o częstotliwościach będących wielokrotnością częstotliwości podstawowej, Prądy te w zależności od rzędu harmonicznej tworzą układ zgodny przeciwny bądź zerowy,
- oddziaływanie pomiędzy harmonicznymi różnych rzędów jest ignorowane,
- sieć jest modelowana przez jej trójfazowe odpowiedniki, odzwierciedlone dla składowych symetrycznych.

Podstawą analizy jest liniowa zależność:

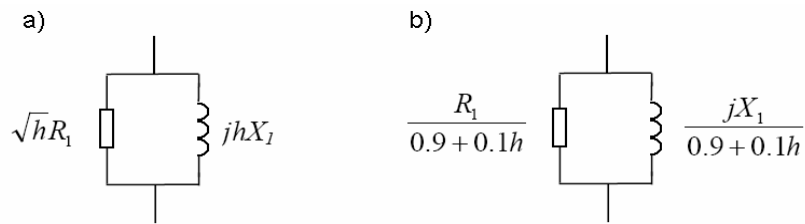
$$[I_h] = [Y_h][V_h] \quad (1)$$

gdzie $[I_h]$ jest wektorem prądu węzłowego prądu harmonicznego wpływającego do każdej szyny zbiorczej, $[V_h]$ wektorem harmonicznych spadków napięcia a $[Y_h]$ macierzą admitancji sieciowej przy częstotliwości $f_h = hf_1$ [4].

Do uzupełnienia macierzy admitancyjnej konieczne jest zbudowanie modelu systemu dla rozważanej harmonicznej. W literaturze znajdują się schematy zastępcze głównych elementów systemu biorących udział w przepływie prądu harmonicznego tzn. transformatorów, linii i maszyn wirujących. Stosowany schemat zastępczy odwzorowuje przepływ prądu dla wszystkich składowych symetrycznych (zgodnej przeciwnie i zerowej). Zależność (1) może być rozwiązana symulacyjnie jako zestaw $3N \times 3N$ równań, gdzie N jest ilością szyn systemu. Wtedy każdy element wektorów $[I_h]$ i $[V_h]$ jest rozmiaru 3×1 i zawiera prąd lub napięcie właściwej szyny. Podobnie pojedynczy element macierzy $[Y_h]$ jest rozmiaru 3×3 i dla symetrycznych elementów systemu jest to macierz diagonalna. Odwracając macierz $[Y_h]$ otrzymujemy harmoniczną macierz impedancyjną systemu $[Z_h]$. Elementy leżące na jej przekątnej $Z_{h,ii}$ są impedancjami własnymi szyn natomiast elementy nie leżące na przekątnej są impedancjami wzajemnymi związanymi ze spadkiem napięcia na szynie i kiedy prąd harmoniczny wpływa do szyny j . [4]. Obliczenia $[Z_h]$ dla pewnego przedziału częstotliwości pozwalają na wykrycie potencjalnych warunków rezonansowych w sieci.

3.1. Model obciążenia harmonicznego

Odwzorowanie obciążenia jest jednym z największych problemów przy modelowaniu systemu elektroenergetycznego, ze względu na różnorodność częstotliwościowych charakterystyk impedancyjnych odbiorów przyłączonych do sieci oraz zmienność struktury obciążenia podczas normalnej pracy. Dwa najbardziej rozpowszechnione modele przedstawia rysunek 5.

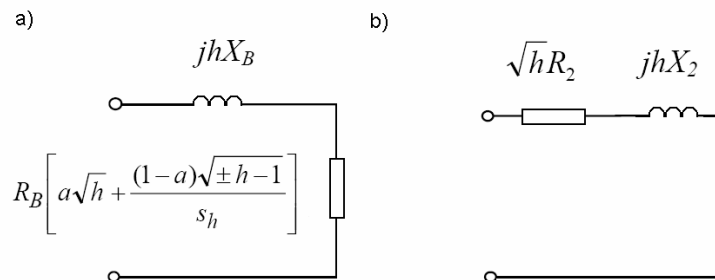


Rys. 5. Harmoniczne modele obciążenia: a) wysokoczęstotliwościowy, b) niskoczęstotliwościowy

W modelach tych R_1 i X_1 są rezystancją i reaktancją obciążenia dla składowej podstawowej.

3.2. Maszyny elektryczne

Maszyna indukcyjna może być przedstawiona za pomocą schematu pokazanego na rysunku 6. Wartości R_B i X_B są rezystancją i reaktancją maszyny przy zablokowanym wirniku, s_h jest poślizgiem wirnika przy częstotliwości odpowiadającej harmonicznej h . Wskaźnik $a = \frac{R_1}{R_B}$, gdzie R_1 przyjmuje zwykle wartości w zakresie 0,45 - 0,5. Więcej szczegółowych modeli maszyn indukcyjnych opisanych jest w literaturze [5].



Rys. 6. Schemat zastępczy maszyny: a) Indukcyjnej, b) synchronicznej

Maszyny synchroniczne są modelowane za pomocą schematu pokazanego na rysunku 6b). Wartości R_2 i X_2 odpowiadają rezystancji i reaktancji maszyny dla składowej przeciwnej.

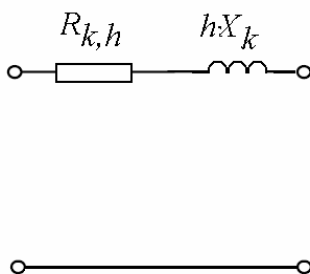
$$X_2 = \frac{(X_d'' + X_q'')}{2} \quad (2)$$

Dla składowej zerowej w schemacie zastępczym należy uwzględnić szeregową impedancję uziemienia punktu neutralnego generatora.

3.3. Transformatory

Dla składowej zgodnej i przeciwnej transformatory modelowane są przez ich szeregowe impedancje. R_K i X_K są rezystancją i reaktancją dla składowej podstawowej, a $R_{K,h}$ oblicza się z zależności:

$$R_{K,h} = R_K (c_0 + c_1 h^b + c_2 h^2) \quad (3)$$



Rys. 7. Schemat zastępczy transformatora

Wartości współczynników c i b podane są w tabeli 1.

TABELA 1

Wartości parametrów do schematu zastępczego transformatora.

Wielkość transf.	c_0	c_1	c_2	b
Małe	0.85 - 0.9	0.05-0.08	0.05-0.08	0.9-1.4
Duże	0.75-0.8	0.1-0.13	0.1-0.13	0.9-1.4

3.4. Linie, kompensatory i inne elementy

Linie napowietrzne i kablowe modelowane są za pomocą czwórników typu Π połączonych łańcuchowo. Liczba szeregowo połączonych czwórników zależy od długości linii. Dla harmonicznych o rzędach poniżej 50 wystarczająco dokładne jest użycie jednego czwórnika na każde 30 km linii napowietrznej WN. W przypadku linii kablowych należy użyć jednego czwórnika na każde 1,5 km linii. Cewki i kondensatory służące do kompensacji mocy biernej modelowane są jako impedancje skupione.

3.5. Źródła harmonicznych

Źródła harmonicznych odwzorowywane są jako źródła prądowe generujące prądy o częstotliwościach odpowiadających rozważanym składowym. Ich wartości opisane są przez amplitudę i przesunięcie fazowe. Wartości te podawane są zwykle przez producentów turbin.

Jeżeli analizujemy kilka turbin przyłączonych do jednego zespołu szyn zbiorczych musimy uwzględnić efekt sumowania opisany szerzej w normie IEC 614000 - 21. Całkowity prąd wpływający do szyn zbiorczych określa zależność:

$$I_h = \sqrt{a \sum_k I_{h,k}^2} \quad (4)$$

gdzie $I_{h,k}$ jest udziałem źródła k w prądzie h -tej harmonicznej, a współczynnik a zależy od rzędu harmonicznej i dla $h < 5$ $a = 1$, $5 \leq h \leq 10$ $a = 1.4$, $h > 10$ $a = 2$.

W zależności od rzędu harmonicznej wektory prądów przyjmują różne układy. Dla rzędów $h = 3k + 1$ wektory tworzą kolejność zgodną, $h = 3k - 1$ przeciwną a $h = 3k$ zerową.

4. IMPEDANCJA HARMONICZNA

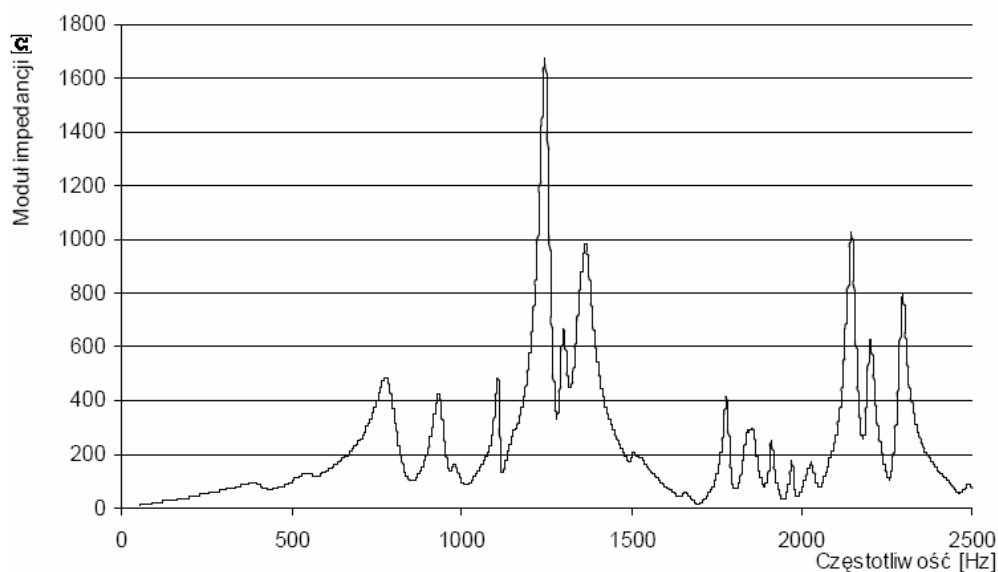
Najistotniejszym parametrem umożliwiającym określenie poziomu odkształcenia sinusoidy napięcia jest impedancja harmoniczna. Terminem tym określa się charakterystykę impedancji wejściowej systemu (zarówno moduł jak i argument) w wybranym punkcie sieci w funkcji częstotliwości [6]. Od kilku lat oprócz metod obliczeniowych rozwijane są metody pomiaru zespolonej impedancji harmonicznej $Z_s(h)$ systemu elektroenergetycznego.

Podstawą większości z nich jest różnicowa zależność:

$$\underline{Zs}(h) = -\frac{\underline{\Delta U}(h)}{\underline{\Delta I}(h)} = -\frac{U_2(h) - U_1(h)}{I_2(h) - I_1(h)} \quad (5)$$

gdzie $\underline{U}_1(h)$, $\underline{I}_1(h)$ to zespolone napięcie i prąd harmonicznej h przed zmianą stanu systemu a $\underline{U}_2(h)$, $\underline{I}_2(h)$ to napięcie i prąd rozważanej harmonicznej po zmianie stanu systemu wywołanej najczęściej zmianą obciążenia Z_c . Do pomiaru impedancji obciążenia stosowane są najczęściej metody czynne [7,8,9,10], które wykorzystują urządzenia zaburzające stan pracy sieci w kontrolowany sposób. Opracowano również metody bierne [11,12], które w większości bazują na załączaniu lub odłączaniu odbiornika dużej mocy (np. baterii kondensatorów do kompensacji mocy biernej). Okazuje się, że nawet naturalna zmienność prądu obciążenia sieci, może nieść wystarczającą ilość informacji do oszacowania impedancji harmonicznej z dość dużą dokładnością.

Pomiar impedancji harmonicznej daje najbardziej precyzyjne wyniki, jednak operatorzy systemu elektroenergetycznego nieufnie podchodzą do stosowania metod inwazyjnych. Symulacja komputerowa na modelu zbudowanym z elementów omówionych w punkcie 3 tego opracowania daje możliwość w miarę dokładnego oszacowania wartości impedancji harmonicznej bez ingerencji w strukturę systemu. Przykładowy przebieg impedancji harmonicznej dla projektowanej farmy wiatrowej w miejscowości Słodków w woj. lubelskim przedstawia rysunek 8.



Rys. 8. Zmiany amplitudy impedancji systemu w funkcji częstotliwości w punkcie przyłączenia farmy Słodków

Na charakterystyce tej widoczne są liczne maksima związane z występowaniem groźnych rezonansów pewnych elementów systemu. Posiadając charakterystykę częstotliwościową impedancji systemu i mając informacje podane przez producenta turbiny o wartości prądu dla poszczególnych harmonicznych oblicza się wartość odkształcenia napięcia.

5. SKUTKI WYSTĘPOWANIA HARMONICZNYCH W SYSTEMIE I METODY I REDUKCJI

Harmoniczne wpływają różnie na rozmaite urządzenia. Poniżej przedstawiono niektóre szkodliwe efekty występowania harmonicznych.

- Linie. W przewodach linii elektroenergetycznej wzrastają straty mocy czynnej w stosunku do strat przy sinusoidalnych przebiegach prądu. Moc przenoszona w układzie jest stała. Współczynnik zmiany strat wyraża się zależnością:

$$\delta_p = \frac{\Delta P - \Delta P_{\sin}}{\Delta P_{\sin}} = \frac{I^2 - I_1^2}{I_1^2} = (THDi)^2 \quad (6)$$

gdzie ΔP oznacza straty mocy czynnej przy prądzie odkształconym, ΔP_{\sin} straty mocy czynnej przy prądzie sinusoidalnym. Dodatkowo dla linii kablowych wskutek przepływu prądów harmonicznych wzrastają straty dielektryczne.

- Kondensatory. Kondensatory działają jak rezonatory zwiększające amplitudy harmonicznych. Indukcyjność układu zasilania może przy niektórych częstotliwościach harmonicznych rezonować z kondensatorami, powodując powstawanie dużych natężeń i napięć dla tych częstotliwości. Wzrost natężenia i napięcia staje się z kolei przyczyną uszkodzenia dielektryka we wnętrzu kondensatora, co prowadzi do jego przegrzania. Kiedy dielektryki kondensatorów wysychają, mają mniejszą zdolność rozpraszania ciepła i stają się bardziej podatne na uszkodzenia ze strony harmonicznych. W miarę pogłębiania się tych uszkodzeń może nastąpić zwarcie lub zapłon.
- Transformatory. Obecność harmonicznych w przebiegach napięcia powoduje wyższe napięcie transformatora i większe oddziaływanie na izolację, co w efekcie przynosi przegrzewanie się transformatora, skrócenie jego żywotności, zwiększenie straty w miedzi i w żelazie ze względu na histerezę i prądy wirowe, a także znaczne, destruktywne oddziaływanie na izolację.

- Silniki. Obecność harmonicznych w przebiegach napięcia jest przyczyną powstawania pól magnetycznych, które obracają się z prędkością odpowiadającą częstotliwościom harmonicznych. W efekcie powoduje to przegrzewanie się silnika, wibracje mechaniczne i hałasy, pulsujący moment obrotowy, wzrost strat spowodowanych przez prądy wirowe oraz histerezę w tworzeniu i uzwojeniach rotora, zmniejszenie wydajności i żywotności, a także większe destruktywne oddziaływanie na izolację uzwojenia silnika.
- Wyłączniki automatyczne. Harmoniczne mogą uniemożliwiać poprawne działanie cewek przerywających i w efekcie wyłączniki automatyczne mogą nie zadziałać i we właściwy sposób nie wyłączyć dopływu prądu.
- Liczniki energii czynnej. Tarcze indukcyjne są wykalibrowane do dokładnego działania jedynie dla częstotliwości podstawowej. Harmoniczne generują dodatkowy moment obrotowy tych tarcz, powodując nieprawidłowe ich działanie i niewłaściwe odczyty.
- Sprzęt elektroniczny i urządzenia sterowane komputerowo. Prawidłowe działanie niektórych urządzeń elektronicznych zależy od momentów przechodzenia sinusoidy przez zero lub wartości szczytowych napięcia. Harmoniczne mogą zmienić te parametry, powodując nieprawidłowe działanie oraz przedwczesne zużycie sprzętu.

Jeżeli analiza wskazuje przekroczenie obowiązujących limitów zawartości harmonicznych w napięciu możliwe jest zastosowanie jednego z kilku środków zapobiegawczych w celu ich redukcji. Jeden z nich to zwiększenie mocy zwarciowej sieci. Wiąże się to ze zmniejszaniem impedancji wzdłużnych, jednak wysokie koszty tego rozwiązania sprawiają, że operator systemu rzadko wyraża zgodę na tego typu działania. Istotne znaczenie dla poprawy kształtu napięcia w określonych węzłach sieci elektroenergetycznej mają pasywne filtry wyższych harmonicznych LC. Szeregowa gałąź filtra LC dla danej harmonicznej stanowi praktycznie zwarcie, ponieważ moduły reaktancji X_L i X_C dla częstotliwości harmonicznej sobie równe. Filtracja napięcia w sieci wymaga stosowania w danym węźle co najmniej kilku takich gałęzi filtra LC. Zaletą filtrów pasywnych jest niewątpliwie ich prosta budowa, ale wymagają one stosowania dławików o znacznych gabarytach. Wady tej pozbawione są nowoczesne rozwiązania filtrów aktywnych. Praca takich filtrów polega na wprowadzaniu do sieci przebiegów kompensujących harmoniczne prądu pochodzące od przekształtnika turbiny wiatrowej.

6. WNIOSKI

W tym artykule zostały przedstawione główne zagadnienia związane ze zniekształceniami harmonicznymi wprowadzanymi do systemu elektroenergetycznego przez farmy wiatrowe. Decydujący wpływ na poziom tych zniekształceń ma sposób współpracy generatora z siecią. Głównym źródłem prądów harmonicznymi są energoelektroniczne urządzenia do konwersji energii. Najnowsze rozwiązania tych urządzeń oparte na tranzystorach IGBT wytwarzają prąd coraz bardziej przypominający sinusoidalny, jednak problem harmonicznymi pogłębia się ze względu na coraz to większą ilość zniekształceń wprowadzanych do sieci przez odbiorniki nieliniowe. W normach regulujących sprawę jakości energii ustalane są coraz bardziej rygorystyczne limity, które po wejściu w życie wyeliminują z pracy część jednostek opartych na starszych rozwiązaniach.

LITERATURA

1. Sedighizadeh M. Rezazadeh.: Harmonic Analysis and Performance Improvement of a Wind Energy Conversions System with Double Output Induction Generator. *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 27, page 250, 2008.
2. Kacejko P.: *Generacja rozproszona w systemie elektroenergetycznym*. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin, 2004.
3. Operator LUBZEL Dystrybucja.: *Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej*. Lublin, 1998.
4. Papathanassiou S., Papadopoulos M.: Harmonic Analysis in Power System with Wind Generation. *IEEE Transactions on power delivery*, Vol. 21, 2006.
5. Arrillaga J., Smith B.: *Power System Harmonic Analysis*. John Wiley & Sons LTD., USA, 1998.
6. Borkowski D.: Analiza możliwości wykorzystania naturalnej zmienności prądu obciążenia do estymacji impedancji harmonicznymi systemu elektroenergetycznego. XIV Sympozjum Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych, Kraków, 2004.
7. Staroszczyk Z., Mikołajuk K.: New invasive method for localisation of harmonic distortion sources in power systems. *European Transaction on Electric Power*, Vol. 8 No. 5, October 1998.
8. Sumner M., Palethorpe B., Thomas D.W.P., Zanhchetta P. Di Pizza M.C.: A technique for power supply harmonic impedance estimation using a controlled voltage disturbance. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 17, No. 2, March 2002.
9. Palethorpe B., Sumner M. and Thomas D. W. P.: System impedance measurement for use with active filter control. *Proceedings of IEE PEVD2000*, London, September 2000.
10. Gretsch R., Neubauer M.: System impedances and background noise in the range 2 kHz to 9 kHz. *European Transaction on Electric Power*, Vol. 8, No. 5, October 1998.
11. Xu W., Ahmed E. E., Zhang X., Liu X.: Measurement of network harmonic impedances: Practical implementation issues and their solutions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 17, No. 1, January 2002.

12. Girgis A., McManis P.: Frequency domain techniques for modelling or transmission networks using capacitor switching induced transients. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 3, July 1989.

Rękopis dostarczono dnia 3.10.2008 r.

Opiniował: prof. dr hab. inż. Antoni CIEŚLA

HARMONIC ANALYSIS IN A POWER SYSTEM WITH WIND TURBINES

Jakub FURGAŁ

ABSTRACT *Wind turbines with energy conversion systems inject harmonic currents in to the network, which may potentially created distortion problems. The base of power system harmonic analysis is calculation system harmonic impedance. It is important to create the harmonic model of power system. There are also direct methods of mensuration the harmonic impedance. Turbines manufacturer give the information about level of harmonic currents. When we have harmonic impedance characteristic and information given by manufacturer we can calculate the voltage distortion on an output of turbine.*