

Filtr aktywny Xinus wyższych harmoniczných prądu i kompensator mocy biernej w systemie zasilania maszyny wyciągowej

W artykule przedstawiono sposób realizacji i wyniki badań kompensacji mocy nieaktywnych maszyny wyciągowej, wykonanej za pomocą równoległego filtra aktywnego wyższych harmoniczných XINUS i kompensatora mocy biernej. Omówiono stan prawny na podstawie obowiązujących w Polsce norm i ustaw oraz przedstawiono problematykę jakości energii. Pokazano również sposób doboru filtra do odbioru nieliniowego wraz z omówieniem jego znaczenia dla procesu kompensacji wyższych harmoniczných prądu.

1. WSTĘP

Przy współpracy z polskimi naukowcami w firmie Elmech opracowano równoległy filtr aktywny o nazwie Xinus. Jego zadaniem jest filtracja wyższych harmoniczných prądów wprowadzanych do sieci przez odbiory nieliniowe. Zastosowany w nim innowacyjny algorytm sterujący, umożliwiający uzyskanie granicznej dynamiki filtracji harmoniczných, stawia filtr Xinus w czołówce filtrów w skali świata. Cechy użytkowe filtra Xinus świetnie sprawdzają się w najtrudniejszych aplikacjach przemysłowych, takich jak: współpraca z generatorem napięcia, przekształtnikami tyrystorowymi i diodowymi dużej mocy, nieliniowymi odbiorami szybkozmiennymi oraz w systemach zasilających aparaturę pomiarową i medyczną. Filtr Xinus jest również laureatem kilku nagród i wyróżnień, z czego najcenniejszymi są Złoty Medal Prezesa SEP oraz Złoty Medal Targów Poznańskich.

Instalacja równoległego filtra aktywnego Xinus i baterii kondensatorów w systemie zasilania maszyny wyciągowej (Rys. 1) jest pierwszym tego typu projektem realizowanym w Polsce.

Skala trudności i odpowiedzialności projektu była bardzo duża. Szybkozmiennosc obciążenia, duży współczynnik szczytu prądu wraz z b. wysoką stromością narastania prądów obciążenia, głębokie zapady napięcia, dochodzące do 100% oraz duża wrażli-

wość instalacji na ripple pochodzące z kluczkowania tranzystorów filtra, to główne problemy z jakimi należało się zmierzyć. Ponadto projekt był prowadzony pod nadzorem KOMAG-u, co wymagało realizacji rozległych analiz wpływu urządzeń na modernizowaną sieć.

W artykule omówiono przebieg realizacji projektu z uwzględnieniem zagadnień jakości energii, sposobu doboru filtra, kluczowych jego parametrów oraz przedstawiono wyniki badań filtra Xinus zainstalowanego na maszynie wyciągowej (Rys. 2).



Rys. 1. Widok napędu modernizowanej maszyny wyciągowej



Rys. 2. Widok filtra aktywnego Xinus

2. JAKOŚĆ ENERGII

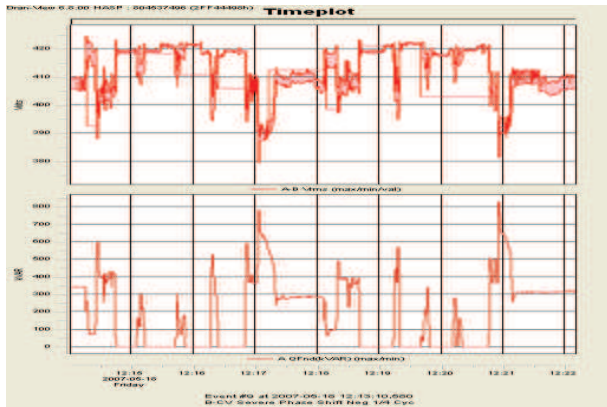
Definicje wszystkich jakościowych parametrów napięcia oraz sposoby ich pomiarów znajdują się w normie PN-EN 50160. Norma ta obowiązuje w większości krajów europejskich i jest traktowana jako standard, choć w niektórych krajach, jak np. w Norwegii, obowiązują bardziej zastrzone kryteria dotyczące jakości energii [1]. Drugim ważnym dokumentem jest rozporządzenie [2], które w części dotyczącej parametrów napięcia opiera się na wspomnianej normie. Jego celem jest określenie warunków jakościowych, jakie musi spełnić podmiot przyłączony do sieci, ze względu na możliwość zakłócenia jej parametrów napięcia. Dotyczy to zarówno odbiorców jak i producentów energii. Trzecią grupę przepisów stanowią normy PN-EN 61000, które definiują wymagania dla odbiorców małej mocy. Normy te określają poziomy zakłóceń wprowadzanych do sieci zasilającej, wyznaczają sposoby ich badania oraz określają poziomy odporności na zakłócenia pochodzące z sieci. Wskazane dokumenty tworzą pewną, stosunkowo spójną logikę, w której odbiory różnej mocy są traktowane stosownie do poziomu wiedzy technicznej i skali wywołanego przez nie problemu dotyczącego jakości energii. Inaczej są traktowane urządzenia małej mocy, których jednostkowy negatywny wpływ na sieć zasilającą jest znikomy, jednak w swojej skali stanowią znaczne zagrożenie dla jakości energii. Do tej grupy można zaliczyć np.: komputery osobiste, lampy wyładowcze i fluoroscencyjne, napędy małej mocy i inne urządzenia. Określa się dla nich wymagania, których spełnieniem obarcza się wytwórcę, a gwarancją ich spełnienia jest oświadczenie – w tym przypadku o zgodności z dyrektywami CE. Z drugiej strony mamy do czynienia z odbiorami

dużej mocy, w których ograniczenia techniczne lub ekonomiczne nie pozwalają na to, aby spełniały one tak restrykcyjne wymagania jak odbiory małej mocy. Jednak w tym przypadku jedyną drogą spełnienia warunków określonych w rozporządzeniu [2] jest zapewnienie przez projektanta lub odbiorcę wykonania instalacji zasilającej, która spełni postawione warunki przyłączenia.

Są również inne powody od wyżej wymienionych norm i ustawy, które zaczęły decydować o wzroście zainteresowania zagadnieniami jakości energii. Najważniejsze to:

- **rosnąca świadomość odbiorców**, że energia jest również towarem, a pojęcie jakości energii precyzuje jej cechy jako towaru [3],
- **wzrost liczby i mocy jednostkowej niespokojnych, nieliniowych, niesymetrycznych odbiorników**. W następstwie rozwoju technologii elementów półprzewodnikowych dużej mocy, wymagano wzrostu wydajności i automatyzacji procesów produkcyjnych, wszechobecna stała się energoelektronika. Szacuje się, że obecnie w krajach przemysłowych ponad 60%-70% wszystkich odbiorników energii stanowi energoelektronika,
- **rosnący koszt awarii**. W dobie wzrostu efektywności procesów produkcyjnych jakość energii ma wpływ na wielkość produkcji. Przerwy w produkcji są powodem ogromnych strat ekonomicznych,
- **rozwój metod i środków technicznych służących do pomiaru wskaźników jakości energii**. Dzięki temu wskaźniki jakości energii stały się mierzalne, a ich rejestracja pozwala na powiązanie występujących zaburzeń jakości energii ze stanami awaryjnymi urządzeń i przerwami w produkcji.
- **wysokie koszty inwestycji służących ochronie przed skutkami złej jakości energii**. W UE pochłaniają one 1,2 mld € rocznie.

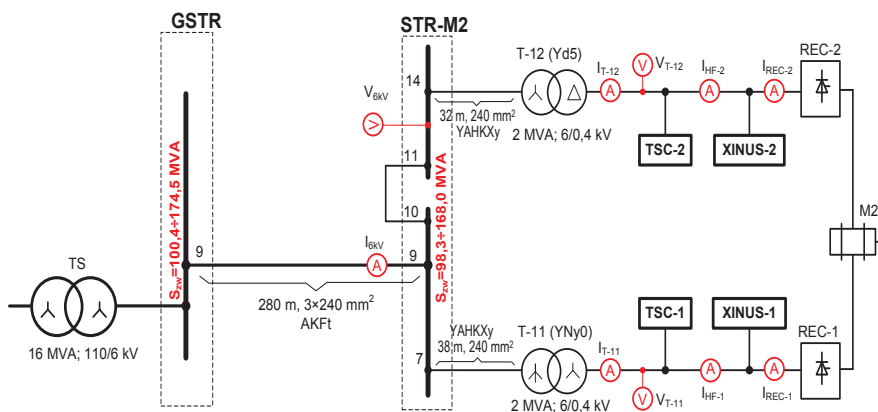
Ciekawym i wartym odnotowania faktem jest to, że mimo iż zagadnienia dotyczące jakości energii rozwijały się od samego początku wykorzystania elektryczności, to dopiero współcześnie stały się rzeczywistym problemem. Niewątpliwie głównym winowajcą jest mikroprocesor, który odpowiada za dynamiczny rozwój energoelektroniki. Czas ostatnich dwudziestu lat, to czas rozwoju energoelektroniki i czas, w którym można obserwować rozwój podejścia do problematyki, przyczyn i skutków pogarszającej się jakości energii. Harmoniczne napięcia i prądu, niesymetria i moc bierna są jednymi z głównych przyczyn pogarszania się jakości energii i obniżenia sprawności systemu zasilającego. **Harmoniczne w prądzie** wpływają na istotny wzrost strat cieplnych w transformatorach, kablach i innych urządzeniach przyłączonych do sieci na skutek prądów wirowych w rdzeniach elementów



Rys. 3. Wpływ mocy biernej, pobieranej przez odbiór niespokojny, na wahania napięcia

indukcyjnych oraz wzrostu rezystancji przewodów na skutek zjawiska naskórkowości. Harmoniczne prądu płyną pomiędzy źródłem a odbiorem i na swej drodze, na skutek działania impedancji sieci, powodują powstawanie odkształceń napięcia, zwanych harmonicznymi napięciami (THDU). **Harmoniczne w napięciu**, w przeciwieństwie do harmonicznymi prądu płynących pomiędzy źródłem a odbiorem, oddziałują na całą sieć zasilającą. Cecha ta jest niepożądana, ponieważ wpływa negatywnie na wszystkie przyłączone do sieci odbiory. Powoduje to liczne konsekwencje w postaci przegrzewania się elementów urządzeń, przepalania bezpieczników, zadziałania zabezpieczeń nadprądowych, zakłóceń pracy urządzeń mikroprocesorowych i wiele innych. **Moc bierna** natomiast podnosi wartość skuteczną prądu. Stanowi więc dodatkowe obciążenie transformatora i przewodów oraz w głównej mierze odpowiada za wahania napięcia, które dobrze obrazuje rysunek 3 i następująca zależność:

$$\Delta U = U_0 \frac{Q}{S_{zw}}, \quad (1)$$



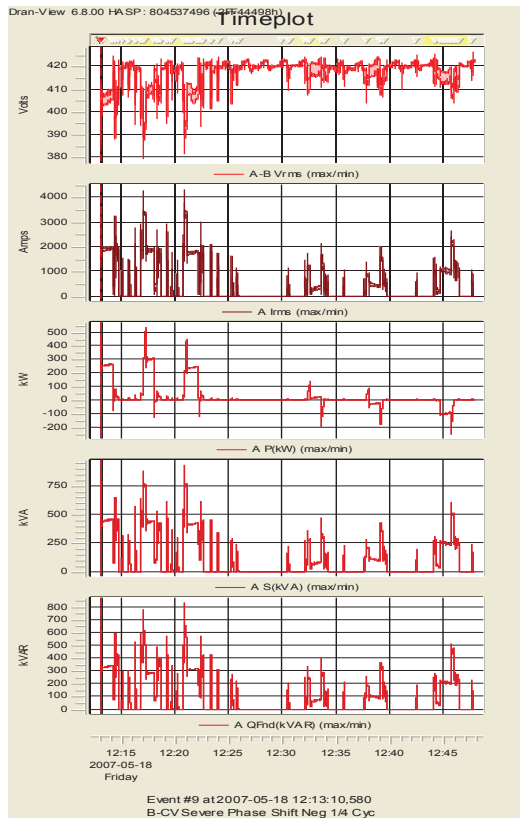
Rys. 4. Schemat blokowy zasilania maszyny wyciągowej z zaznaczonymi punktami zainstalowania baterii kondensatorów TSC i filtra aktywnego XINUS

w której: ΔU – spadek napięcia; U_0 – napięcie na zaciskach odbiornika; Q – moc bierna; S_{zw} – moc zwarciowa obwodu.

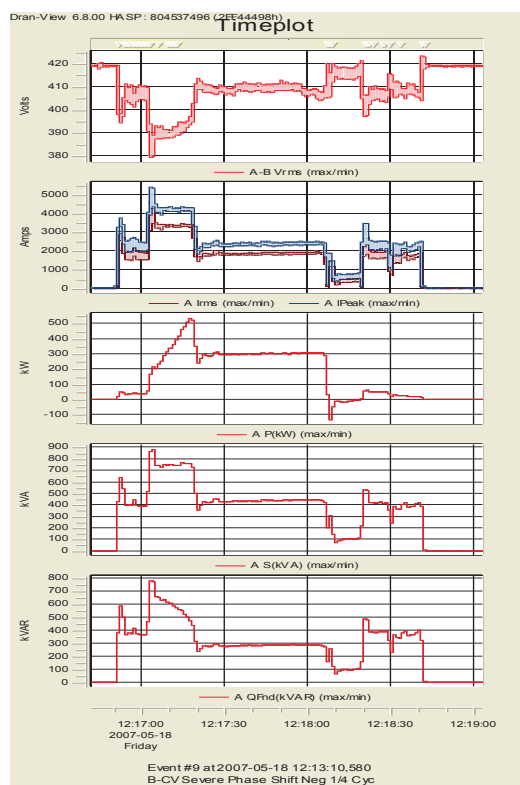
Niesymetria napięcia jest odpowiedzialna z kolei za niesymetrię obciążenia w poszczególnych fazach urządzeń trójfazowych. W silnikach elektrycznych asynchronicznych skutkuje to niesymetriami momentów napędzających, co objawia się wibracjami, które prowadzą do przyspieszenia zużycia silnika.

3. REALIZACJA PROJEKTU

Celem modernizacji maszyny wyciągowej było skompensowanie mocy biernej do poziomu $\text{tg}\phi=0,4$ oraz obniżenie odkształceń napięcia po stronie SN do poziomu zgodnego z normą PN-EN 50160. Dodatkowe cele, to ochrona baterii kondensatorów przed wpływem harmonicznego napięcia oraz obniżenie negatywnego wpływu przekształtnika maszyny wyciągowej na inne urządzenia przyłączone do tej samej sieci zasilającej. Poza technicznymi aspektami, kompensacja mocy biernej i eliminacja harmonicznego prądu mają niebagatelne znaczenie ekonomiczne. Postawione cele same w sobie są proste i precyzyjne. Biorąc jednak pod uwagę charakter odbioru, ich realizacja wymagała poszerzonej analizy pod względem bezpieczeństwa. Oznaczało to konieczność wykonania analizy wpływu pracy baterii kondensatorów i filtra aktywnego Xinus na pracę maszyny wyciągowej, która łączy w sobie wszystkie cechy odbioru nieliniowego i odbioru niespokojnego. Silnik prądu stałego maszyny wyciągowej jest zasilany dwóch prostowników sześciopulsowych, które z kolei zasilane są niskim napięciem poprzez dwa transformatory (Y/ Δ i Y/Y o mocy 2 MVA każdy) ze wspólnej rozdzielnic SN (Rys. 4).

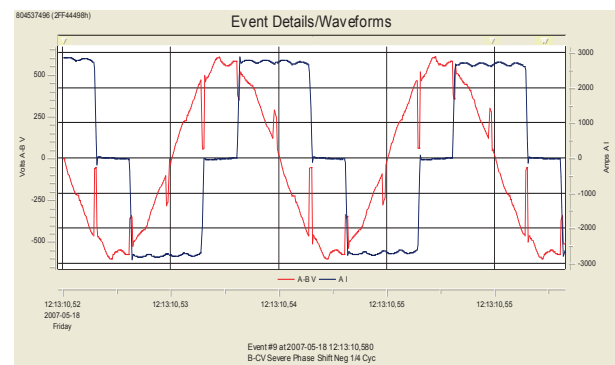


Rys. 5. Przebiegi czasowe U , I , P , Q , S , zarejestrowane w jednej z gałęzi nn, w czasie 34 minut pracy maszyny wyciągowej



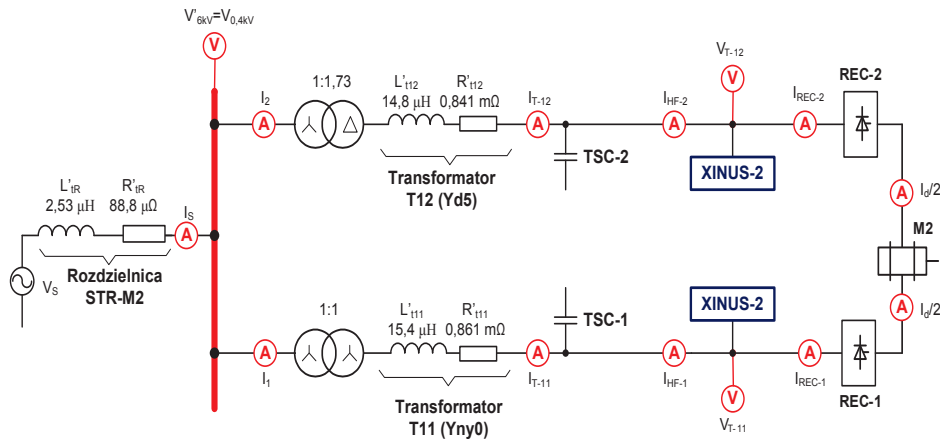
Rys. 6. Przebiegi czasowe U , I , P , Q , S , zarejestrowane w jednej z gałęzi po stronie nn podczas pojedynczego cyklu pracy maszyny wyciągowej

Ze względu na charakter pracy maszyny wyciągowej (częste rozruchy i hamowania) charakteryzuje się ona dużą zmiennością obciążenia (Rys. 5). Na jej cykl pracy, który trwa średnio 110 s, składają się kolejno: rozruch, jazda ze stałą prędkością, hamowanie i pozycjonowanie klatki. Rozruch, hamowanie i pozycjonowanie to najcięższe momenty pracy maszyny. Stanowią one 70% całego okresu pracy. W tym czasie prąd osiąga 2–2,5-krotność średniego prądu. Wahania mocy przekładają się na wahania napięcia o głębokości do 43 V (Rys. 6). Z kolei poziom harmonicznych w prądzie THDI potrafi przekroczyć wartość 30%, zaś poziom harmonicznych w napięciu THDU osiąga wartość nawet 25%. Należy również zwrócić uwagę na widoczne w napięciu (Rys. 7) głębokie jego zapady, pochodzące od komutacji tyrystorów, jak również na dużą stromość narastania prądu odbioru, która wynika z braku dławików w układzie przekształtnika maszyny wyciągowej.



Rys. 7. Przebieg napięcia i prądu w jednej fazie zasilania maszyny wyciągowej, po stronie nn

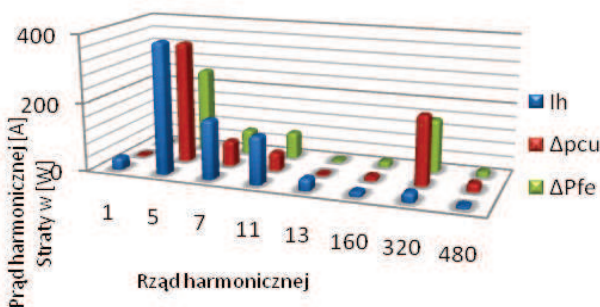
Realizacja projektu rozpoczęła się od gruntownej analizy symulacyjnej. Miała ona za zadanie analizę możliwości osiągnięcia założonych celów technicznych oraz analizę mogących wystąpić negatywnych interakcji w układzie zasilania maszyny wyciągowej po modernizacji. Szczególny nacisk położono na względy bezpieczeństwa pracy maszyny. W tym celu w środowisku symulacyjnym odtworzony został model kompletnego układu zasilania maszyny wyciągowej z zaimplementowaną baterią kondensatorów TSC i modułem filtra aktywnego Xinus (Rys. 8). Do symulacji został wykorzystany rzeczywisty algorytm filtra aktywnego Xinus, wstawiony w formie zamkniętego modułu, oznaczony na schemacie symbolem Xinus 1 i 2. W środowisku symulacyjnym moduł ten zachowuje się jak niezależne urządzenie. Dzięki temu można było przeprowadzić obserwację zachowania się całego systemu zasilania maszyny wyciągowej w różnych warunkach pracy, ze szczególnym uwzględnieniem filtra. Pierwsza symulacja



Rys. 8. Schemat zastępczy układu zasilania maszyny wyciągowej z idealnymi transformatorami i ich parametrami zastępczymi sprowadzonymi na stronę nn

została przeprowadzona z wyłączonym filtrem i baterią kondensatorów. Miała ona na celu stwierdzenie zgodności modelu symulacyjnego z układem rzeczywistym. Przebadano kolejno baterię kondensatorów, filtr aktywny Xinus i oba urządzenia pracujące jednocześnie. Ocenę wyników symulacji przeprowadzono na podstawie analizy przebiegów prądu i napięcia punktach pomiarowych oznaczonych symbolami A i V (Rys. 8).

Wyniki symulacji potwierdziły poprawność stworzonego modelu. Przeprowadzono więc dodatkową analizę wrażliwości przekształtnika i transformatora na oddziaływanie ripple pochodzących z kluczkowania tranzystorów filtra. Analiza pokazała wyraźnie negatywne oddziaływanie ripple, powodujących istotny wzrost strat cieplnych w transformatorze, powodowanych zjawiskiem prądów wirowych i efektu nasłórkowości (Rys. 9). Widoczny jest też wyraźny wzrost strat w zakresie częstotliwości kluczkowania.

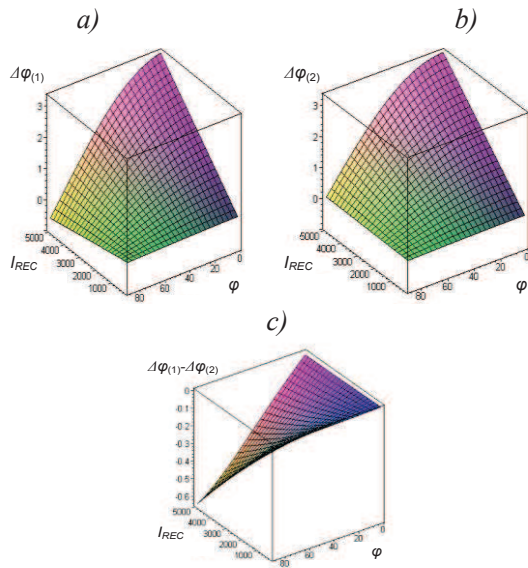


Rys. 9. Obraz strat cieplnych w transformatorze na skutek obecności harmonicznych w prądzie, z pominięciem podstawowej harmonicznej (ΔP_{fe} – straty w rdzeniu, ΔP_{cu} – straty w uzwojeniach transformatora, I_h – prąd danej harmonicznej)

Podobne zjawisko występuje w elementach o charakterze pojemnościowym. Z przeprowadzonych obliczeń wynikało, że poważnie zagrożone są gasiki

na tyrystorach przekształtnika. W związku z tym, prawdziwe jest stwierdzenie, że obecność ripple wywołuje wzrost zagrożenia pojawienia się awarii systemu zasilania maszyny wyciągowej.

Przeprowadzono również analizę wpływu baterii kondensatorów na przesunięcie fazowe napięcia synchronizującego załączanie tyrystorów. Z analizy wyłączono jednak filtr aktywny, gdyż nie wpływa on na harmoniczną podstawową (50 Hz). Na wstępie wyznaczono wartość przesunięcia fazowego napięcia synchronizującego, w zależności od obciążenia, w układzie z wyłączoną baterią kondensatorów. Wynik badania pokazał, że w najgorszym przypadku można się liczyć z przesunięciem napięcia synchronizującego, względem napięcia na zaciskach przekształtnika, nie większym niż $\Delta\phi_V < 3,231$. Jest to mała wartość $\Delta\phi_V$, praktycznie nie wpływająca na poprawność sterowania przekształtnikiem i jest porównywalna z rozrzutem parametrów dynamicznych tyrystorów (w tym rozrzut czasów komutacji). Następnie powtórzono analizę z włączoną baterią kondensatorów, co pozwoliło na wyznaczenie wpływu baterii kondensatorów. Wykresy 3D, pokazane na rysunku 10, przedstawiają zmianę kąta fazowego napięcia synchronizującego w układzie ($\Delta\phi_V = f(I_{REC}, \varphi)$) zarówno bez, jak i z włączoną baterią kondensatorów. Dodatkowo pokazano zmiany kąta przesunięcia fazowego napięcia synchronizującego $\Delta\phi_{V(1)} - \Delta\phi_{V(2)}$, jakie zachodzą w linii zasilającej po załączeniu kompensatora, przy takich samych warunkach obciążenia i sterowania przekształtnika maszyny wyciągowej. Jak widać na rysunku 10, włączenie kompensatora powoduje tylko bardzo małe zmiany kąta przesunięcia fazowego napięcia synchronizującego (nie większe niż $0,65^\circ$). Na tej podstawie można odpowiedzialnie stwierdzić, że załączenie kompensatora nie wpłynie na poprawność działania przekształtników zasilających maszynę wyciągową.



Rys. 10. Przesunięcia fazowe napięć VT oraz V'6 kV: a) w przypadku odłączonego kompensatora; b) w przypadku pełnej kompensacji składowej biernej prądu obciążenia, c) zmiana przesunięcia po założeniu kompensatora

Dobór filtra do aplikacji polega na ocenie zgodności parametrów technicznych urządzenia z wymaganiami aplikacji. Na rynku brak jest jasnej informacji nt. parametrów technicznych filtrów aktywnych, które pozwoliłyby na porównanie urządzeń. W związku z tym w tabeli 1 przedstawiono najważniejsze parametry, decydujące o zdolności filtra do kompensacji harmonicznych odbioru.

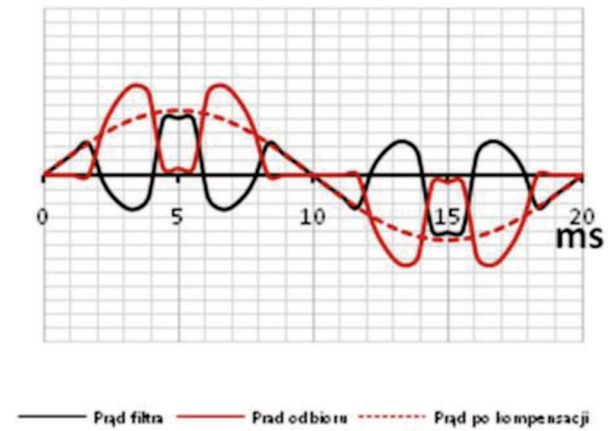
Tabela 1

Najważniejsze parametry filtra aktywnego, decydujące o jego przydatności technicznej

Nazwa parametru	Opis
U_n, f – napięcie i częstotliwość sieci	Są to parametry sieci, w której może pracować filtr
I_{max} – maksymalny prąd szczytowy filtra	Jest to maksymalna amplituda prądu chwilowego, jaką potrafi wygenerować filtr aktywny
di/dt_{max} i di/dt_{min} – maksymalna i minimalna dynamika narastania prądu filtra, podawana w [A/ms]	Jest to podstawowy parametr filtra, określający możliwą do uzyskania stromość prądu kompensującego, generowanego przez filtr. Decyduje on o zdolności filtra do skompensowania odbioru.
$\Delta I_{ripple, p-p}$ – ripple - zakłócenia	Ripple są zakłóceniami jakie generuje filtr do sieci na skutek kluczkowania tranzystorów. Są one bardzo niebezpieczne dla innych urządzeń pracujących w sieci, do której przyłączony jest filtr.
f_{PWM} – częstotliwość kluczkowania filtra	Od częstotliwości kluczkowania zależy wysokość rzędu kompensowanych harmonicznych

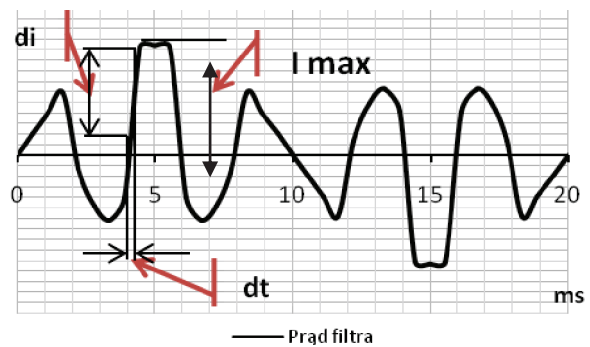
Znaczenie prądu odbioru nieliniowego oraz prądu kompensującego generowanego przez filtr aktywny

pokazano na przykładowym przebiegu (Rys. 11). Suma obu prądów daje sinusoidalny przebieg prądu po kompensacji (kolor czerwony przerywany).



Rys. 11. Przebieg napięcia sieci, prądu pobieranego przez odbiór nieliniowy, prądu kompensującego i prądu po kompensacji

Podane w Tabeli 1 parametry opisują maksima charakteryzujące powyższy przebieg. Tak więc, I_{max} to maksymalna chwilowa wartość prądu jaką będzie musiał wygenerować filtr aktywny, natomiast di/dt (nazywane dynamiką filtra) odpowiada za zdolność filtra do odtworzenia kształtu prądu odkształceń (Rys. 12), czyli za skuteczność kompensacji harmonicznych prądu odbioru.



Rys. 12. Prąd kompensujący generowany przez filtr aktywny

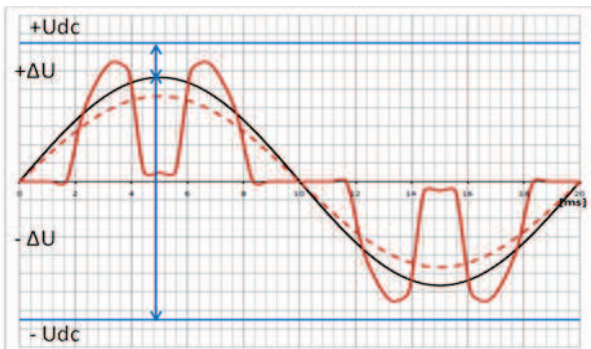
Dynamika filtra jest wartością zmienną i zależy od trzech parametrów, tj. od:

- różnicy napięcia w zasobniku energii, którym jest kondensator w filtrze aktywnym i chwilowej wartości napięcia sieci,
- wartości indukcyjności dławika w filtrze,
- efektywności sterowania:

$$\left| \frac{di}{dt} \right|_{\max(\min)} = K \cdot \left| \frac{1}{L} \left(\frac{\sqrt{3}}{3} U_{dc} + (-)\sqrt{2} U_{f,RMS} \right) \right| \quad (2)$$

gdzie: K – współczynnik efektywności sterowania, L – indukcyjność dławika, U_{dc} – napięcie na kondensatorze (magazynie energii filtru), $U_{f,RMS}$ – napięcie fazowe sieci, f_{PWM} – częstotliwość kluczowania.

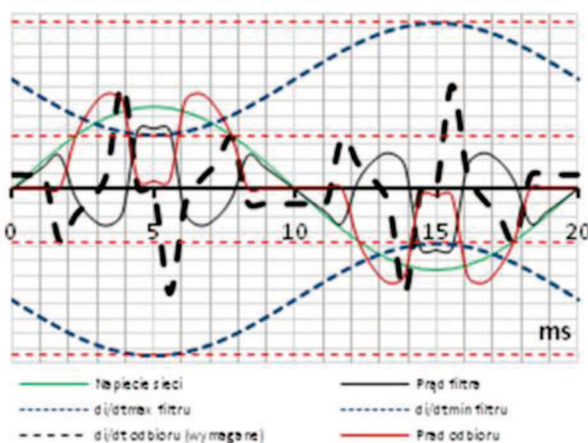
Jak widać na rysunku 13, dynamika filtru może mieć dwa kierunki działania, w zależności od tego, czy w danej chwili filtr będzie uzupełniał braki prądu względem I_{RMS} , czy też zmniejszał jego wartość chwilową.



Rys. 13. Widok dynamiki filtru aktywnego

Drugą wartością, od której zależy dynamika, jest indukcyjność dławika w filtrze aktywnym. Jak wynika ze wzoru (2), jeśli dławik ma dużą indukcyjność to dynamika będzie maleć i odwrotnie.

Kolejną, trzecią wartością we wzorze, jest współczynnik K określający zdolność układu sterowania do wykorzystania dynamiki filtru, określonej dwoma poprzednimi parametrami. Można powiedzieć, że jest to najważniejszy parametr, zależny od stopnia zaawansowania algorytmu sterującego.



Rys. 14. Przebieg dynamiki filtru i dynamiki odbioru

Na rysunku 14 przedstawiono zależność pomiędzy dynamiką prądu odbioru a dynamiką prądu filtru. Miejsca, gdzie przebieg dynamiki odbioru przekracza przebieg dynamiki filtru, to miejsca występowania

niedokompensowania. Sytuacją idealną będzie więc sytuacja, w której dynamika zmian prądu odbioru będzie się mieścić w granicach dostępnego zakresu dynamiki filtru. Jednak krótkotrwałe niedokompensowanie występujące na skutek obecności wąskich pików w prądzie odbioru nie wpływa znacząco na wynik kompensacji. Na rysunku 14 widać również, że przesunięcie fazowe prądu odbioru może mieć wpływ na chwilową skuteczność kompensacji.

Kolejnym ważnym parametrem filtru jest poziom ripple, które wprowadza do sieci zasilającej. O ich wartości decyduje indukcyjność dławików na wejściu w filtry aktywne:

$$\Delta I_{ripple,p-p} = \frac{U_{DC}}{6 \cdot L \cdot f_{sampl}} \quad (3)$$

gdzie

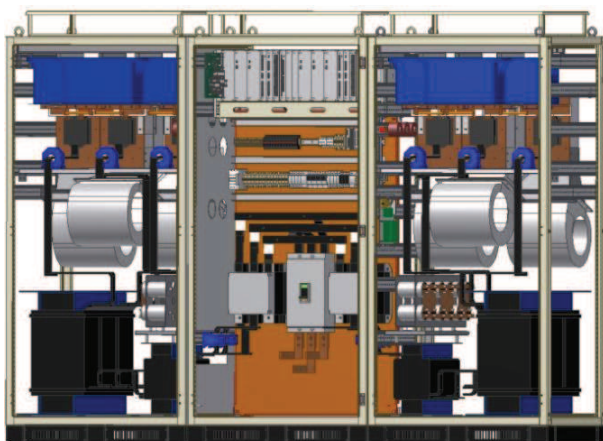
$$f_{sampl} = 2 \cdot f_{PWM} \quad (4)$$

Ze wzoru (3) wynika, że ripple są tym mniejsze, im większa jest indukcyjność dławika (przeciwnie do dynamiki). Ważnym zadaniem jest więc znalezienie kompromisu pomiędzy tymi dwoma wartościami tak, aby zachować jak największą dynamikę i jak najmniejsze ripple, które przedostają się do kompensowanej sieci. Nie jest to jednak zadanie łatwe, bo przy satysfakcjonującej dynamice wartość rippli będzie duża. W związku z tym, aby zachować stosunkowo wysoką dynamikę i niski poziom rippli w sieci, zamyka się je w filtrze i wytraca na rezystorach, obniżając w ten sposób znacznie sprawność energetyczną filtru.

W filtrze aktywnym Xinus opracowana została unikalna konstrukcja filtru wejściowego, dzięki której nie wytraca się mocy rippli na rezystorze i jednocześnie możliwe jest dowolne kształtowanie dynamiki filtru aktywnego, stosownie do wymagań odbioru. Jest to ogromna zaleta filtru Xinus na tle innych konstrukcji, zwłaszcza jeśli mamy do czynienia z dużymi mocami.

4. OPIS APLIKACJI

Do realizacji opisywanego projektu zostały wykorzystane dwa filtry Xinus 1 i Xinus 2. Każdy z filtrów składał się z dwóch jednostek pracujących równolegle (Rys. 15). Filtry charakteryzowały się następującymi parametrami technicznymi: $I_{max} = 2500$ A; $di/dt_{max} = 9150$ A/ms; $di/dt_{min} = 2950$ A/ms; $\Delta I_{ripple,p-p} = 1,1$ A; $f_{PWM} = 8$ kHz. Parametry pracy zostały ustalone na podstawie przeprowadzonych prób na ma-

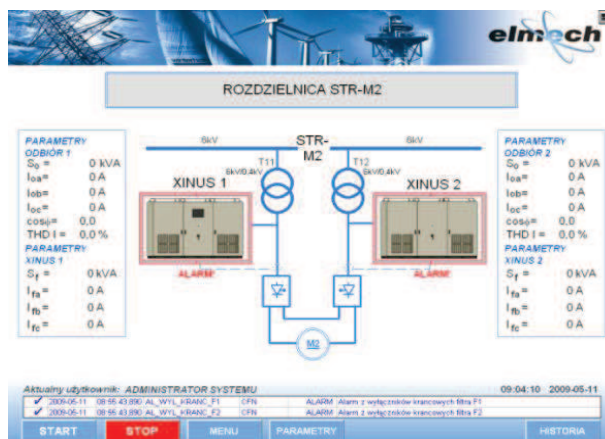


Rys. 15. Widok wnętrza filtra składającego się z dwóch jednostek pracujących w układzie pracy równoległej

szynie wyciągowej. Są one wysoko ustawione względem możliwości technicznych filtra z uwagi na duże wymagania odbioru.

Uruchomienie filtra Xinus na maszynie wyciągowej było prowadzone w dwóch etapach. Pierwszy etap był etapem sprawdzającym. Polegał on na tym, że filtry pracowały na siebie, pobierając z sieci jedynie moc strat. Jeden z filtrów generował zadane harmoniczne, drugi natomiast je kompensował. Pozwoliło to na sprawdzenie poprawności działania filtra poza systemem zasilania maszyny wyciągowej, przez co ograniczono do minimum czas wyłączenia maszyny z eksploatacji. Drugi etap realizowany był już na maszynie wyciągowej i polegał na doborze parametrów pracy filtrów dla różnych jej stanów pracy. Podczas prób natrafiono na przewidywane w fazie symulacyjnej problemy związane z głębokimi zapadami napięcia sieci, które pochodziły z przekształtnika tyrystorowego. Problem udało się rozwiązać poprzez dobór prawidłowych nastaw regulatorów filtra Xinus. Warto wspomnieć, że ze względu na wymagania odbioru, w każdej gałęzi zasilającej pracują po dwa filtry w układzie pracy równoległej. Wszystkie filtry są monitorowane ze wspólnego panelu operatorskiego (Rys. 16). Na panelu operatorskim wyświetlane są parametry pracy filtra oraz bieżące stany pracy, jak i alarmy.

Xinus posiada rozbudowane funkcje konfiguracyjne, pozwalające na wybór trybów i parametrów pracy (Tabela 2) dla zapewnienia możliwości dostosowania filtra do wymagań aplikacji. Tryby podstawowe kompensacji harmonicznych wybierane są alternatywnie. Można je łączyć z trybami kompensacji mocy biernej i symetryzacji obciążeń za pomocą mechanizmu priorytetów. Pozwala on na zarządzanie wykorzystaniem dostępnej w danej chwili mocy. Mechanizm priorytetów określa, który z trybów jest najważniejszy, a następnie określa kolejność pozosta-



Rys. 16. Główny ekran panelu operatorskiego

łych i dostępność poziomów mocy w danym trybie. Jest to wygodny mechanizm pozwalający na efektywne wykorzystanie dostępnej mocy filtra.

Tabela 2

Tryby pracy filtra aktywnego Xinus

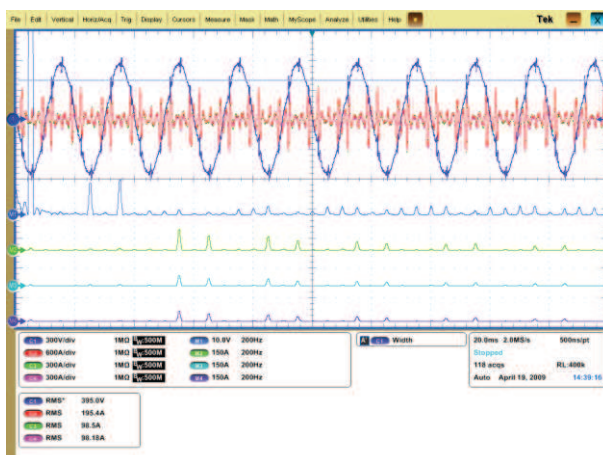
Tryb pracy	Opis
Kompensacja pełna	Kompensacja wszystkich harmonicznych, subharmonicznych i interharmonicznych
Kompensacja pełna z wyłączeniami	Kompensacja jak w trybie pełnym z wyłączeniem określonych harmonicznych. Przydatne w układach, w których następuje samokompensowanie się harmonicznych
Kompensacja selektywna	Kompensuje wybrane harmoniczne do zadanego poziomu
Kompensacja mocy biernej	Kompensacja mocy biernej z możliwością określenia maksymalnej mocy, dostępnej dla tego trybu
Tryb symetryzacji prądów obciążenia	Symetryzacja prądów sieci obciążających transformator. Zapobiega to występowaniu niesymetrii napięć

Dodatkowo istnieje możliwość wyboru trybu kompensacji z predykcją i bez predykcji. Tryb z predykcją jest dedykowany dla odbiorów nieliniowych o stabilnym obciążeniu. W trybie predykcji algorytm, na podstawie poprzedniego okresu, prognozuje parametry prądu kompensującego, dzięki czemu otrzymuje się zwiększoną precyzję kompensacji. Tryb kompensacji bez predykcji dedykowany jest niespokojnym odbiorom nieliniowym, dla których regulacja prądów kompensacyjnych odbywa się z graniczną, możliwą do uzyskania z filtra dynamiką. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu innowacyjnego algorytmu estymacji i predykcji odkształconego i niesymetrycznego napięcia sieci, poprawiającego właściwości układu sterowania.

Filtr Xinus może pracować w sieciach nn do napięcia sieci 690 VAC oraz w sieciach SN przy wykorzystaniu transformatora dopasowującego napięcie lub w trybie bezpośrednim w sieciach do 6 kV (przy wy-



Rys. 17. Przebieg napięcia w sieci zasilającej maszynę wyciągową oraz widmo jego harmonicznych przed kompensacją



Rys. 18. Przebieg napięcia w sieci zasilającej maszynę wyciągową oraz widmo harmonicznych z włączoną kompensacją w trybie z wykluczeniem 5 i 7 harmonicznej (trzy dolne przebiegi pokazują widmo harmonicznych kompensujących z rozbięciem na poszczególne jednostki, jak i ich sumę)

korzystaniu wielopoziomowego falownika napięcia). Moc filtrów można skalować przez pracę równoległą kilku jednostek mocy.

Na rysunkach 17 i 18 pokazano efekt pracy filtru, widziany w napięciu zasilającym maszynę wyciągową po stronie nn. Na rysunkach nie widać jednak harmonicznych prądu sieci, które kompensuje filtr, a jedynie jest widziany efekt jego pracy w przebiegu napięcia. Oscylogramy obrazują wpływ harmonicznych prądu, działających poprzez impedancje sieci na powstawanie harmonicznych w napięciu. Na rysunkach widać widmo harmonicznych napięcia przed kompensacją (Rys. 17) oraz widmo napięcia po kompensacji (Rys. 18).

5. UWAGI I WNIOSKI

Projekt związany z filtrem aktywnym XINUS był realizowany prawie dwa lata. Zdobyte w tym czasie doświadczenie z maszyną wyciągową pozwoliło na uzyskanie rezultatów znacznie przekraczających możliwości symulacji. O sukcesie projektu zdecydował jednak zastosowany innowacyjny algorytm sterowania.

Literatura

1. www.nve.no
2. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego, Dz. U. Nr 93 poz 623 z 4 maja 2007.
3. Hanzelka Z.: Jakość energii elektrycznej.

Recenzent: dr inż. Marcin Habrych

XINUS ACTIVE FILTER OF HIGHER HARMONICS IN CURRENT AND NON-ACTIVE POWER COMPENSATOR IN SUPPLY SYSTEM OF A WINDER

Methods of conducting research works on compensation of non-active power of a winder made by means of a XINUS parallel active filter of higher harmonics and a non-active power compensator and the results of research have been presented in the paper. A legal status of the issue has been discussed on the basis of standards and acts in force in Poland. The issues of energy quality have been presented. A method of a selection of a filter for a non-linear receiver has been shown as well. A significance of use of the filter for compensation of higher harmonics in current has been discussed.

АКТИВНЫЙ ФИЛЬТР XINUS ВЫСШИХ ГАРМОНИК ТОКА И КОМПЕНСАТОР ПАССИВНОЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМЕ ПИТАНИЯ ПОДЪЕМНОЙ МАШИНЫ

В статье представлен способ выполнения и результаты исследований компенсации неактивных мощностей подъемной машины, выполненной при помощи параллельного активного фильтра высших гармоник XINUS и компенсатора реактивной мощности. Описаны юридические правила на основании обязывающих в Польше норм, законов и представлена проблематика качества энергии. Показан также способ отбора фильтра для нелинейное получения с обсуждением его значения для процесса компенсации высших гармоник тока.