

Kompensacja mocy biernej i wyższych harmonicznym prądu w sieciach SN z wykorzystaniem układów hybrydowych opartych na nowych rozwiązaniach filtrów aktywnych Xinus

W artykule opisano wstępną fazę projektu dotyczącego kompensacji mocy biernej i wyższych harmonicznym skipowej maszyny wyciągowej, zainstalowanej w KWK Ziemowit. Omówiono problematykę wyboru rodzaju układu kompensacji, doboru do warunków technicznych oraz zastosowanych założeń rozwiązań. Wyniki realizacji projektu przedstawione zostaną na przyszłorocznej konferencji SEMAG 2011.

1. WPROWADZENIE

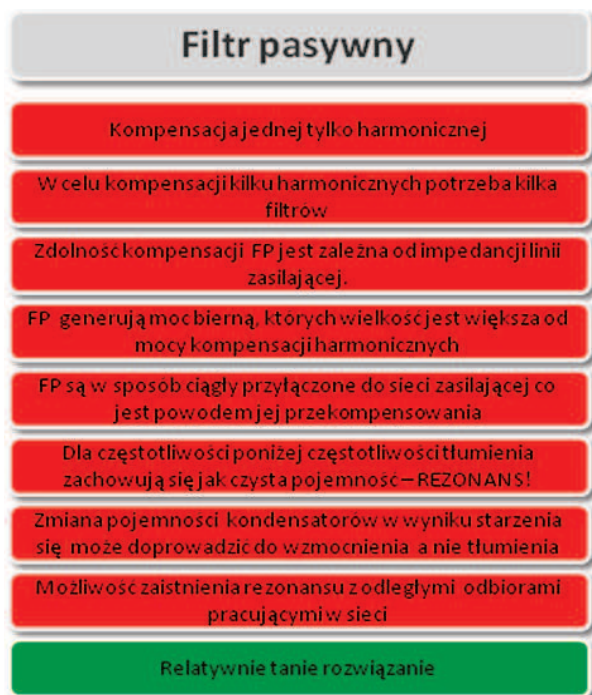
Obecnie wdrażane są nowe rozwiązania, sprawdzonych na rynku przemysłowym, filtrów aktywnych rodziny Xinus [1]. Tym razem jest to filtr projektowany do pracy w systemach zasilania SN. Wdrożenie tego rozwiązania zbiega się z modernizacją systemu zasilania maszyny wyciągowej w KWK Ziemowit, gdzie C&T Elmech jest podwykonawcą i dostawcą hybrydowego układu kompensacji mocy biernej i wyższych harmonicznym o mocy 7,5 MVar. Układ ten składa się z filtru aktywnego Xinus, który ma współpracować z nadążną baterią kondensatorów, pracującą w sieci SN. Będzie to druga tego typu instalacja po oddanej do eksploatacji w roku ubiegłym, w kopalni węgla kamiennego LW Bogdanka (wówczas łączna moc wynosiła 4 +MVar, a układ pracował na stronie nn). Obie te instalacje są pierwszymi w UE, w których wykorzystano innowacyjne rozwiązanie filtrów aktywnych Xinus, na bardzo trudnym i wymagającym odbiorze, jakim jest napęd maszyny wyciągowej.

Obecnie realizowane przedsięwzięcie opiera się na zebranych w LW Bogdanka doświadczeniach i dotyczy systemu zasilania głównych maszyn skipowych kopalni KWK Ziemowit. Dotychczasowy układ kompensacji składał się tam z baterii kondensatorów o mocy około 6kVar i filtru pasywnego 5. harmonicznym o mocy 1,8 MVar. Powodów do moderniza-

cji systemu zasilania maszyny było kilka. Jednym z nich był układ kompensacji oparty na kondensatorach zawierających niedozwolony obecnie związek PCB. Dodatkowo filtr pasywny w wyniku utraty pojemności kondensatorów rozstroił się i nie spełniał swoich wymagań, zaś stara rozdzielnica choć jeszcze spełniała swoje funkcje, to na tle dzisiejszych rozwiązań przypominała raczej eksponat muzealny. Ponadto dotychczasowy układ kompensacji w chwilach postoju maszyny wyciągowej zwracał do sieci moc bierną pochodzącą od filtru pasywnego.

2. FILTRY AKTYWNE A FILTRY PASYWNE

W chwilach wyboru sposobu modernizacji różnych obiektów na ogół stajemy przed rozterką, czy wybrać stare, sprawdzone technologie czy też zastosować nowe rozwiązania. Tak też było i w tym przypadku. Naprzeciw siebie stanęły dobrze znane i wydawałoby się sprawdzone rozwiązania filtrów pasywnych z początku XX wieku i nowoczesne filtry aktywne z początków XXI stulecia. Na rysunkach 1.a i 1.b kolorem czerwonym oznaczono wady, zaś kolorem zielonym zalety dla każdego z rozwiązań. Z porównania widać, że filtr pasywny ma mocną konkurencję w filtrze aktywnym. Po szczegółowej analizie wad i zalet obu rozwiązań wynika, że budowa układu kom-



Rys. 1a. Wady i zalety filtrów pasywnych



Rys. 1b. Wady i zalety równoległych filtrów aktywnych Xinus

pensacji w oparciu o filtry pasywne, spełniającego oczekiwania użytkownika, jest trudnym zadaniem, a działanie urządzenia nie jest w żaden sposób kontrolowane. Budowa układu kompensacji składającego się z wielu filtrów pasywnych jest natomiast karkołomnym przedsięwzięciem, w rezultacie czego powstaje system o niemożliwych do określenia cechach użytkowych (nieprzewidywalny, niekontrolowany, niestabilny, wymagający od użytkownika pójścia na wiele kompromisów odnośnie jakości funkcjonowania).

Dzisiejsze technologie otwierają przed użytkownikiem inne, lepsze możliwości rozwiązania problemów związanych z utrzymaniem jakości energii. Przede wszystkim pozwalają na budowę układów w pełni kontrolowanych, a w związku z tym stabilnych w zmieniających się warunkach pracy systemu energetycznego danego przedsiębiorstwa. Daje to możliwość precyzyjnego osiągnięcia projektowanych cech układu i poziomu kompensacji a także otwiera przed użytkownikiem nowe możliwości jakie wynikają ze współpracy klasycznych nadążnych układów kompensacji mocy biernej z filtrami aktywnymi Xinus.

3. OPIS ROZWIĄZANIA

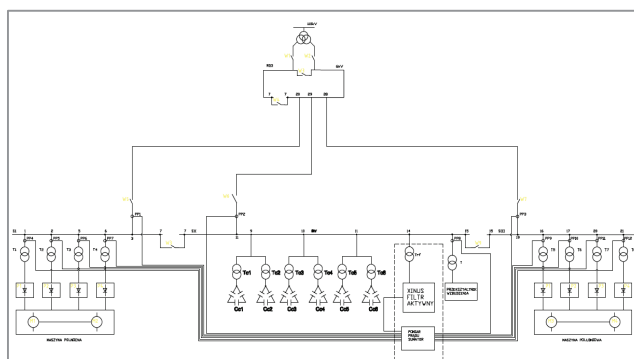
Realizowane w KWK Ziemowit przedsięwzięcie polega na wymianie rozdzielnic SN wraz z układem kompensacji. W głównych warunkach technicznych

określono wymagania kompensacji mocy biernej na poziomie $\text{tg } \varphi \leq 0,33$, oraz ograniczenia wyższych harmonicznych (WH) w napięciu do poziomu $\text{THDU} \leq 8\%$ dla klasy II, według normy PN-EN 6100-2-4, a także niewprowadzanie do sieci mocy biernej pojemnościowej. Ciekawym jest, że po raz pierwszy spotkano się z wymogiem spełnienia powyższej normy. W normie tej uwzględnia się i osobno stawia wymagania dla dwóch rodzajów negatywnego oddziaływania WH na urządzenia. Wpływ cieplny, który jest zależny od poziomu stałej obecności WH w sieci zasilającej, mierzony jest jako wartość średnia w okresach 10-minutowych (zgodnie z normą PN-EN 50160). Konsekwencją tego rodzaju wpływu jest wzrost temperatury pracy torów kablowych, transformatorów, dławików, kondensatorów, cewek aparatów, styków elektrycznych, itd. Drugim negatywnym skutkiem występowania wyższych harmonicznych w skali chwilowej, dla oddziaływań w czasie mniejszym od trzech sekund, są zakłócenia pracy innych urządzeń, takich jak falowniki napędowe i inne urządzenia energoelektroniczne, jak również powstawanie momentów pasożytniczych w silnikach jak i zakłócenia pracy urządzeń AKPiA.

Analiza pomiarów wykazała, że poza wartościami chwilowymi THDU sięgającymi 16,4% występują również stany przejściowe, w wyniku których pojawiają się harmoniczne: 3. i jej wielokrotności. Było to o tyle niespodzianką, że sieć zasilająca jest rodzaju IT, natomiast przekształtniki napędowe pod-



Rys. 2. Zmienność widma wyższych harmonicznych napięcia zależnie od kąta wysterowania 6-ciopulsowego przekształtnika tyrystorowego, oraz fazy pracy napędu maszyny wyciągowej



Rys. 3. Układ zasilania maszyn wyciągowych północnej i południowej wraz z układem kompensacji

łączone są w układzie 6-ciopulsowym. Zastosowanie więc filtrów pasywnych na 5. i 7. harmoniczną byłoby ryzykowne. Kolejnym napotkanym problemem jest zmienność widma harmonicznych w zależności od kąta wysterowania przekształtnika tyrystorowego i fazy pracy napędu. Na rysunku 2 przedstawiono trzy widma harmonicznych napięcia w jednym cyklu pracy maszyny wyciągowej. Z przedstawionego na rysunku 2 wykresu wynika, że 5., 7. i inne WH napięcia są bardzo zmienne. Z tego względu trudno jest więc zaprojektować dobrze działający układ kompensacji oparty na filtrach pasywnych.

Wybrano więc rozwiązanie będące połączeniem sprawdzonego rozwiązania filtrów aktywnych pracujących już na maszynie wyciągowej z wykorzystaniem nowoczesnych rozwiązań baterii kondensatorów. Spełniło ono wszystkie wymagania techniczne jak i okazało się najtańsze spośród zaoferowanych rozwiązań. Na wybór nowoczesnego rozwiązania miała zapewne również wpływ wizja lokalna w miejscu pracy pierwszej takiej instalacji w górnictwie, w kopalni węgla LW Bogdanka, jak również pozytywna opinia użytkownika.

4. NADAŻNA BATERIA KONDENSATORÓW

W związku z powyższymi uwarunkowaniami podjęto decyzję o zastosowaniu dławikowej baterii kon-

densatorów odstrojonej od trzeciej harmonicznej, z punktem rezonansowym na poziomie 135 Hz. Takie rozwiązanie zabezpiecza układ przed stanami przejściowymi. Bateria kondensatorów jest tyrystorową baterią nadążną o mocy 5,5 MVAR i stopniu wynoszącym 925 kVAR. Każde dwa stopnie przyłączone są do rozdzielnic SN za pośrednictwem istniejącego już w układzie transformatora 6300 V/525 V (rys. 3). Zastosowanie transformatora pozwoliło na wykorzystanie baterii kondensatorów z łącznikami tyrystorowymi, co z kolei pozwala na zbudowanie nadążnego układu kompensacji mocy biernej.

O załączaniu i wyłączaniu poszczególnych stopni decyduje nowoczesny układ regulacji, który zostaje uruchomiony na podstawie pomiarów prądów w trzech fazach i w trzech dopływach do rozdzielnic. Załączanie i wyłączanie poszczególnych stopni odbywa się w chwili przejścia prądu przez zero, co eliminuje występowanie prądów łączeniowych jak i chwilowych niesymetrii obciążenia, rejestrowanych przez nowoczesne układy zabezpieczeń rozdzielni SN.

5. FILTR AKTYWNY XINUS

Aby dobrać filtr aktywny do warunków instalacji należy wyznaczyć jego główne parametry elektryczne, ustalić sposób opomiarowania instalacji oraz do-



Rys. 4a. Przebieg prądu odkształceń widziany w jednej fazie



Rys. 4b. Przebieg dynamiki prądu odkształceń prądu w fazie A

brać do instalacji topologię filtru. Wyznaczenie głównych parametrów elektrycznych filtru wykonuje się na podstawie analizy prądu pobieranego przez odbiór nieliniowy, z którego wydzielamy prąd odkształceń¹. To właśnie prąd odkształceń odpowiada za problemy z jakością energii i to on musi być skompensowany przez filtr. Jednak aby filtr mógł być w pełni efektywny musi mieć swoje parametry, co najmniej równe lub wyższe od parametrów prądu odkształceń (lub takie, aby mógł skompensować prąd odkształceń w zamierzonym stopniu). Na rysunku 4a przedstawiono przebieg prądu odkształceń kompensowanej w tym projekcie maszyny wyciągowej. Można go opisać wartością prądu I_{RMS} odpowiadającą za wzrost strat cieplnych w instalacji oraz I_{max} będącą maksymalną wartością chwilową prądu odkształceń. Te dwa parametry przekładają się bezpośrednio na parametry elektryczne filtru, tj. na moc filtru oraz wymagany prąd maksymalny filtru. Rysunek 4b przedstawia dynamikę zmian prądu odkształceń di/dt , tzn. szybkość zmian prądu odkształceń, która przekłada się bezpośrednio na zaburzenia napięcia, czyli THDU. Jest to kolejny parametr jakim powinien charakteryzować się filtr. Jeżeli filtr jest w stanie odtworzyć wiernie te trzy parametry, to jest w stanie skompensować prąd odkształceń, a tym samym skompensować THDU.

Tak naprawdę filtr aktywny nie kompensuje prądu odkształceń, lecz zasila odbiór nieliniowy prądem odkształceń. A więc odbiór nieliniowy pobiera z sieci sinusoidalny prąd, a z filtru aktywnego pobiera prąd odkształceń. To małe przededefiniowanie pojęcia kompensacji ujawnia rzeczywisty sposób działania filtru aktywnego.

Aby filtr mógł zasilić odbiór prądem odkształceń musi na bieżąco dokonywać pomiaru prądu, jaki pobiera odbiór nieliniowy, oraz wyznaczyć i dostarczyć odbiorowi prąd odkształceń. Aby ten sposób działania miał sens, to układ sterowania filtru musi to robić w czasie rzeczywistym. Im zwłoka w wyzna-

czeniu prądu odkształceń i jego wygenerowaniu jest mniejsza, tym lepsza jest kompensacja. W tabeli 1 zawarto parametry filtru Xinus, wyznaczone z analizy prądów odkształceń z uwzględnieniem wymaganego poziomu kompensacji.

Tabela 1

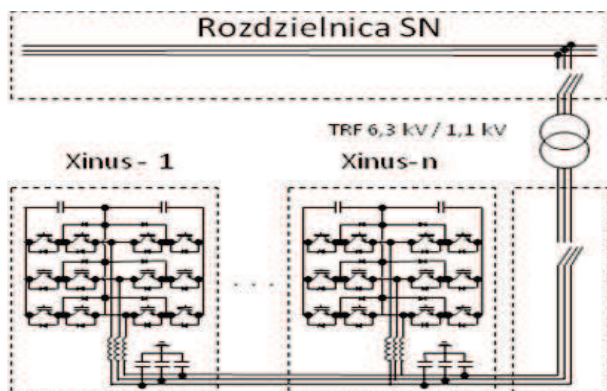
Parametry filtru Xinus, wyznaczone z analizy prądów odkształceń z uwzględnieniem wymaganego poziomu kompensacji

| Parametr | Wymagane wartości po stronie SN |
|---|---------------------------------|
| I_{RMS} - prądu odkształceń | 175 A |
| I_{max} - prąd chwilowy | ≤ 700 A |
| di/dt_{max} - dynamika zmian prądu odkształceń | ~ 1050 A/ms |
| S_{max} - całkowita moc filtru | 2 MVA |
| Możliwa dyspozycja mocy D i Q (mechanizm priorytetów) | 0-100% |

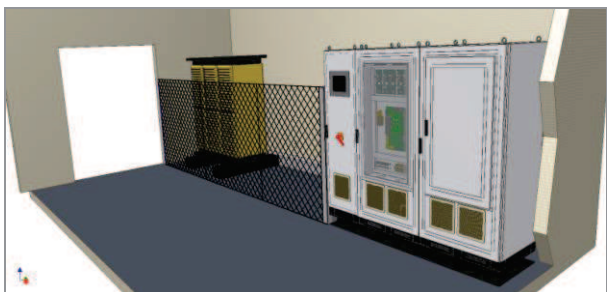
Na rysunku 3 przedstawiono uproszczony schemat rozdzielniczy wraz z odbiorami oraz pokazano miejsce włączenia filtru a także sposób opomiarowania odbiorów. W tym układzie nie ma możliwości wykonania grupowego pomiaru odbiorów, więc zastosowano pomiar selektywny. Mierzone prądy poszczególnych odbiorów doprowadzone są do układu sumującego, z którego wypadkowy prąd dla każdej fazy dostarczany jest do układu sterowania filtrem. Takie rozwiązanie wymaga zastosowania bardzo szybkiego układu cyfrowego, dzięki któremu mamy jednak możliwość indywidualnej analizy poszczególnych prądów przed ich sumowaniem i przesłaniem do filtru Xinus. Rozszerza to możliwości selektywnej kompensacji.

Zastosowany filtr jest sprzętowo prawie identyczny jak konstrukcje falowników napięcia, które wykorzystywane są w aplikacjach napędowych. Wszystkie możliwości i ograniczenia pochodzą z parametrów kluczy jakimi są tranzystory IGBT. W tym przypadku spełnienie wcześniej wyznaczonych parametrów wymaga zastosowania dwóch filtrów aktywnych, pracujących równolegle. W ten sposób uzyskuje się wymagane prądy jak i dynamikę filtru. W sieciach

¹ Prąd niezrównoważenia jest różnicą zniekształconego prądu pobieranego przez odbiór nieliniowy i pierwszej harmonicznej tego prądu. Jest to prąd odpowiedzialny za odkształcenia napięcia objawiające się jako harmoniczne napięcia.



Rys. 5. Topologia filtru aktywnego Xinus pracującego w sieci SN, składającego się z dwóch jednostek pracujących równoległe opartych na 3-poziomym falowniku napięcia



Rys. 6. Widok zabudowy filtru Xinus (dwóch jednostek w pracy równoległej) wraz z transformatorem dopasowującym do sieci SN

zasilających po stronie nn filtry mogą być włączane bezpośrednio. W sieciach SN, ze względu na ograniczenia techniczne wynikające z poziomu napięcia, do włączenia do sieci filtru Xinus zastosowano transformator dopasowujący, którego indukcyjność jest elementem filtru wejściowego typu LCL. Dla omawianej aplikacji zastosowano również trójpoziomowy falownik pracujący na napięciu 1,1 kV, chłodzony cieczą. Takie rozwiązanie pozwala na wzrost mocy

COMPENSATION OF REACTIVE POWER AND HIGHER HARMONICS IN MEDIUM-VOLTAGE NETWORKS WITH THE USE OF A HYBRID SYSTEM BASED ON NEW SOLUTIONS OF ACTIVE XINUS FILTERS

The article describes an initial phase of a project on the compensation of reactive power and higher harmonics of a skip winding machine in the Ziemowit Coal Mine. The issue of selecting a proper kind of the compensation system, according to technical conditions and applied solutions, was presented. The results of the project will be demonstrated next year at the SEMAG 2011 conference.

КОМПЕНСАЦИЯ ПАССИВНОЙ МОЩНОСТИ ВЫСШИХ ГАРМОНИЧЕСКИХ ТОКА В СЕТЯХ SN С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ, ОПЕРАЮЩИХСЯ НА НОВЫХ РЕШЕНИЯХ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ XINUS

В статье описана вступительная фаза проекта, касательно компенсации пассивной мощности и высших гармонических скиповой подъемной машины, установленной на шахте Ziemowit. Обсуждена проблематика выбора типа системы компенсации, отбора к техническим условиям, а также примененных допущенных решений. Результаты реализации проекта будут представлены на конференции SEMAG 2011 в будущем году.

поjedynczej jednostki, w tym przypadku do 1 MVA_r, a tym samym na obniżenie kosztów aplikacji, które wynikają z ograniczenia ilości jednostek pracujących równoległe. Na rysunku 5 przedstawiono topologię oraz sposób włączenia filtru aktywnego Xinus do rozdzielni SN. Na rysunku 6 przedstawiono natomiast wizualizację projektowanego rozwiązania w miejscu planowanego posadowienia.

6. WNIOSKI

Realizacja opisanego projektu oparta jest na naszym doświadczeniu, w tym na największej pod względem mocy i skali trudności instalacji filtrów aktywnych na maszynie wyciągowej w LW Bogdan-ka. Nowe rozwiązanie w sieci SN jest rezultatem realizowanych w firmie Elmech prac badawczo-rozwojowych, przy udziale polskich naukowców. Są one współfinansowane ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu pod nazwą „Xinus4”. W trakcie opracowania jest kolejne rozwiązanie filtru aktywnego Xinus do pracy w sieciach zasilających TN. Nowa wersja filtru umożliwi kompensację wyższych harmonicznych w przewodach fazowych oraz w przewodzie neutralnym. Jest to rozwiązanie z przeznaczeniem dla budynków biurowych, urzędów, szpitali itd., czyli w miejscach, gdzie dominują odbiory jednofazowe, niesymetria, silnie obciążone przewody neutralne i wysokie poziomy odkształceń napięć i prądów.

Literatura

1. B. Balkowski: Filtr aktywny Xinus wyższych harmonicznych prądu i kompensator mocy biernej w systemie zasilania maszyny wyciągowej; *Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa* 2009, nr 7, pp. 90-98.

Recenzent: dr inż. Marcin Habrych