

Andrzej Szromba

Politechnika Krakowska

Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej

Autoreferat w języku polskim

Załącznik nr 3 do wniosku o wszczęcie postępowania habilitacyjnego

Kraków, 20 czerwca 2018

AUTOREFERAT

1. Imię i nazwisko

Andrzej Szromba

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

- magister inżynier, Politechnika Krakowska, Wydział Transportu – obecnie Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, tytuł pracy: *Dobór kodu optymalnego w transmisji danych*, rok 1986;
- doktor nauk technicznych, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki, tytuł pracy: *Analiza pracy jednofazowego równoległego filtra aktywnego ze sterowaniem ślizgowym – badania symulacyjne*, promotor: dr hab. inż. Stanisław Piróg, rok 1998.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.

- 1987-1995: Politechnika Krakowska, kolejno: Wydział Transportu, Wydział Inżynierii Transportowej i Elektrycznej, Inżynierii Elektrycznej, Inżynierii Elektrycznej;
- 1997 - do chwili obecnej: Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej.

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.)

4a. Tytuł osiągnięcia naukowego

Energoelektroniczny kompensator aktywny sterowany sygnałem konduktancyjnym
- monografia habilitacyjna

4b. Autor, tytuł publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy.

Andrzej Szromba, *Energoelektroniczny kompensator aktywny sterowany sygnałem konduktancyjnym*, monografia 540, Politechnika Krakowska, ISDN 0860-097X, Kraków 2016.

Recenzenci wydawniczy:

prof. dr hab. inż. Stanisław Piróg
prof. dr hab. inż. Ryszard Strzelecki

4c. Omówienie celu naukowego ww. pracy i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Wprowadzenie w tematykę przedstawionego pod ocenę osiągnięcia naukowego

Energia elektryczna może być uznana za podstawową formę energii pośredniczącej pomiędzy różnymi formami energii pierwotnej, a pracą wykonywaną przez urządzenia końcowe. Jej zakres stosowalności oraz rozpowszechnienie osiągnęło poziom, przy którym trudno zastąpić ją jakimkolwiek innym medium. Dodatkowo, elektrotechnika – wraz z dziedzinami pokrewnymi – jest to obszarem techniki o bardzo dużej dynamice zmian. Obserwowane są gwałtowne przemiany w technikach oraz efektywności otrzymywania oraz dystrybucji energii elektrycznej. Spodziewane jest zwiększenie zapotrzebowania na energię elektryczną, związane między innymi z nadchodzącą erą elektromobilności.

Odbiorniki energii elektrycznej pracują coraz częściej jako układy nieliniowe oraz niestacjonarne. Zmiany ich mocy często mają charakter stochastyczny. W konsekwencji w przebiegach napięć i prądów permanentnie występują niepożądane składowe, które, dodatkowo, coraz rzadziej można rozpatrywać jedynie w kategoriach wyższych harmonicznych o stałych w czasie parametrach. Ich obecność przyczynia się do pogarszania efektywności pracy obwodów elektrycznych, rozumianej w kategoriach jakości energii elektrycznej oraz strat związanych z jej przesyłaniem.

W dużej mierze zmniejszenie sprawności działania, a nawet nieprawidłowości w pracy urządzeń elektrycznych, związane są z odchyleniami przebiegów napięć zasilających od odpowiadających im sił elektromotorycznych generatorów. Z kolei odchylenia te są skutkiem nieliniowości, bezwładności, oraz rozpraszania energii w liniach zasilających. Zjawiska te można analizować poprzez rozkład prądu linii na składową aktywną i nieaktywną. Jak wiadomo, składowa nieaktywna może być minimalizowana praktycznie bez wpływu na składową aktywną, która jest bezpośrednio związana z pracą wykonywaną w obciążeniach i z tej przyczyny nie może podlegać redukcji.

Kompensowanie prądów nieaktywnych przyczynia się do poprawy jakości energii elektrycznej oraz zmniejsza koszty związane z jej dostarczaniem i użytkowaniem. Według portalu www.leonardo-energy.com roczne straty, wynikające z niedostatecznej jakości energii elektrycznej, tylko w Europie sięgają kwoty 150 mld Euro (*Application Note: The Cost of Poor Power Quality*, R. Targosz, D. Chapman, October 2015).

Jakkolwiek mogłoby się wydawać, że utworzenie bezstratnej i nieinercyjnej linii przesyłowej byłoby wystarczające do idealnej transmisji energii, to problem jest głębszy. Należy brać pod uwagę również wszelkie zjawiska związane z przetwarzaniem energii w obciążeniu (na przykład nieliniowość, niestacjonarność, asymetrię, pulsowanie energii), które poprzez tor transmisyjny oddziałują na pracę generatora. W ich wyniku może pojawić się niedopasowanie energetyczne generatora i obciążenia, rozumiane jako różnica mocy chwilowej źródła energii pierwotnej (nieelektrycznej) oraz mocy chwilowej zadanej formy energii końcowej (nieelektrycznej) obciążenia.

Możliwe są pasywne i aktywne techniki minimalizowania niedopasowań obciążeń do źródeł, a także ich połączenia w postaci technik hybrydowych.

Techniki pasywne związane są ze stosowaniem układów rezonansowych, umieszczanych równolegle w pobliżu urządzeń powodujących odkształcenia prądu. Przed ich zastosowaniem należy przeprowadzić częstotliwościową analizę pracy obwodów zasilających z obciążeniem. Skuteczność redukcji składowych nieaktywnych prądu linii jest niestety zmienna, silnie zależąc od zmian zarówno parametrów obwodów zasilających jak i charakterystyk obciążeń.

Techniki aktywne związane są ze stosowaniem urządzeń kompensujących chwilowe odchylenia prądu zasilającego od przyjętego przebiegu wzorcowego. Urządzenia te znane są pod nazwą równoległych energetycznych (lub energoelektronicznych) filtrów aktywnych (ang. shunt active power filter) lub kompensatorami prądu nieaktywnego. Formalnie rzecz biorąc są to sterowane źródła prądu. Po zidentyfikowaniu różnicy między rzeczywistym a wymaganym prądem linii, kompensator wprowadza poprawkę korygującą.

Kompensatory z reguły budowane są jako odpowiednio sterowane mostkowe falowniki napięcia (albo prądu). W swojej strukturze posiadają one pojemnościowy (albo indukcyjny) zasobnik energii, a jego energia jest wykorzystywana do generowania prądu kompensującego.

Niniejszy wniosek habilitacyjny dotyczy badań nad rozwinięciem pewnej techniki sterowania pracą tego typu urządzeń. Jej cechą szczególną jest pozyskiwanie informacji, potrzebnej do sterowania pracą kompensatora, w drodze obserwacji zmian energii zgromadzonej w jego elementach inercyjnych.

Obiekt i zakres przeprowadzonych badań

Przeprowadzone przez autora badania mają charakter głównie koncepcyjno-symulacyjny. Zostały one opisane w monografii, będącej podstawą wniosku habilitacyjnego. W części symulacyjnej użyto pakietu IsSpice. Już po wydaniu monografii został zbudowany i przetestowany model laboratoryjny kompensatora, działający według opisanej metody. Wyniki badań eksperymentalnych zostały przedstawione w artykule: A. Szromba, W. Mysiński *Voltage-Source-Inverter-Based Conductance-Signal-Controlled Shunt Active Power Filter*, EPE 2017, Warszawa.

Monografia składa się z dziewięciu rozdziałów, opisujących poszczególne etapy badań nad prezentowaną metodą sterowania pracą kompensatora. W dalszej części przedstawiono opis przeprowadzonych badań. Zachowano zgodność struktury autoreferatu ze strukturą monografii.

Rozdział 1. Kompensacja prądu nieaktywnego

Rozdział zawiera opis sposobu uzyskiwania sygnału wzorcowego przy użyciu sygnału konduktancyjnego oraz jego umiejscowienie na tle innych metod otrzymywania sygnałów wzorcowych.

Właściwości użytkowe kompensatora istotnie zależą od sposobu uzyskiwania sygnału wzorcowego, według którego jest on sterowany. Można wyróżnić metody operujące w dziedzinie częstotliwości lub w dziedzinie czasu.

Stosując metody częstotliwościowe określa się parametry niepożądanych składowych harmonicznym prądu obciążenia: ich częstotliwości, amplitudy oraz fazy. Możliwe jest użycie różnych algorytmów, najczęściej powiązanych z fourierowską analizą sygnału: DFT, FFT czy RDFT. Wszystkie te metody wymagają jednak pewnego „systemowego” czasu na identyfikację składowych prądu. Niestety, na opóźnienia wynikające z uwarunkowań przyjętej metody nakładają się kolejne składowe. Jest to niezerowy czas akwizycji sygnałów wejściowych, czas niezbędny do przeprowadzenia wymaganych obliczeń, wreszcie niezerowy czas realizacji obliczonego wzorca przez układ wykonawczy kompensatora. Nieunikniona jest pewna nieadekwatność przebiegu wymaganego względem uzyskanego sygnału wzorcowego oraz względem aktualnej wartości realizowanego przebiegu prądu. W literaturze można spotkać oszacowania spodziewanych opóźnień na poziomie od kilku do kilkunastu milisekund (np.: *Detection is key. Harmonic detection method for active power filter applications*. L. Asiminoaei, F. Blaabjerg and S. Hansen, IEEE Ind. Appl. Mag., 2007).

Z kolei metody czasowe generalnie pozwalają na redukcję wspomnianego opóźnienia systemowego. Równocześnie możliwa jest redukcja wymaganych nakładów sprzętowych i obliczeniowych w obwodzie sterowania kompensatora. Jednak z drugiej strony ograniczony jest zakres selekcji składowych prądu do skompensowania. Wynika to z faktu, że w metodach czasowych podstawową zasadą jest kompensowanie każdego odchylenia prądu linii od przebiegu wzorcowego, bez identyfikowania go z konkretną składową harmoniczną. Niemniej możliwe są pewne formy selekcji sygnałów wejściowych, na przykład poprzez ich filtrację. Pozwala to na rozdzielenie składowych do skompensowania pomiędzy kompensator aktywny oraz pewien zestaw filtrów pasywnych. Podejście takie może mieć uzasadnienie ekonomiczne.

W przypadku obwodów trójfazowych w obszarze metod czasowych szeroko stosowana jest filtracja pewnych sygnałów pośrednich, powstałych po wstępnej transformacji sygnałów napięcia i prądu linii. Dzięki temu możliwe jest kompensowanie w linii zasilającej wybranych składowych prądu lub mocy.

W tym kontekście należy wymienić strategię związaną z zastosowaniem synchronicznego układu odniesienia dq lub algorytm sterowania oparty o tak zwaną teorię mocy chwilowych pq .

W monografii analizowana jest technika uzyskiwania sygnału wzorcowego, działająca w oparciu o metodę czasową. Uznano, że metoda ta jest bardziej przydatna dla planowanego rozszerzenia własności użytkowych kompensatora o możliwość pewnej regulacji przepływu mocy czynnej w obwodzie linia – obciążenie.

Kolejną ważną decyzją jest wybór przebiegu, dla którego będzie określany sygnał wzorcowy. Może to być przebieg prądu kompensatora lub przebieg prądu linii. W pierwszym przypadku będzie to wybór składowej nieaktywnej prądu obciążenia, w drugim – wybór jego składowej aktywnej.

Składowa aktywna prądu obciążenia związana jest z jego mocą czynną. Opóźnienia wprowadzane przez kompensator w realizacji tej składowej jako prądu linii, w szczególności po zmianach mocy obciążenia, powodują nierównowagę pomiędzy energią dostarczaną ze źródła, a mocą rozpraszaną przez obciążenie. Elementami buforującymi energię nierównowagi są elementy inercyjne kompensatora. W związku z faktem, że energia ta związana jest ze zmianami mocy czynnej obciążenia, powinna być odniesiona do okresu cyklu pracy źródła. Zmiany te można nazwać „statycznymi”, w odróżnieniu od zmian bilansujących się w pojedynczym cyklu pracy źródła, a wynikających z kompensowania przez kompensator składowej nieaktywnej prądu obciążenia.

Najczęściej te „statyczne” zmiany energii są niwelowane przy pomocy dedykowanego układu regulacji. Nie musi to być reguła. Zmiany te mogą być wykorzystane do obliczania konduktancji zastępczej obciążenia. Taką właśnie możliwość przedstawiono w monografii.

Zależności łączące energię zgromadzoną w elementach inercyjnych z ich napięciami/prądami umożliwiają obliczenie konduktancji zastępczej obciążenia jako funkcji napięcia/prądu głównego elementu inercyjnego kompensatora. W tym kontekście można mówić o pośrednim, czyli bez pomiaru napięcia i prądu obciążenia, uzyskiwaniu sygnału jego konduktancji zastępczej. Sygnał ten może być wykorzystany do określenia składowej czynnej prądu obciążenia. W konsekwencji można wyznaczyć i zrealizować wymagany przebieg prądu linii według zależności (2.1), która występuje pod tym samym numerem w monografii:

$$\mathbf{i}^* = g(t)\mathbf{u} \quad (2.1)$$

gdzie: \mathbf{i}^* jest wektorem wzorców prądów fazowych linii, $\mathbf{i}^* = \sum_{n=1}^k \mathbf{i}_n^*(t)$, n jest indeksem fazy

$$\mathbf{u} \text{ jest wektorem napięć fazowych linii, } \mathbf{u} = \sum_{n=1}^k u_n(t)$$

$$g = g(t) \text{ jest sygnałem konduktancji zastępczej obciążenia, } g(t) = \frac{p(t)}{\langle\langle \mathbf{u} \rangle\rangle^2}$$

$$p(t) \text{ jest mocą chwilową obciążenia, } p(t) = \sum_{n=1}^k u_n(t)i_n(t)$$

$$\langle\langle \mathbf{u} \rangle\rangle \text{ jest normą chwilową wektora napięć fazowych linii, } \langle\langle \mathbf{u} \rangle\rangle = \sqrt{\sum_{n=1}^k u_n^2(t)}$$

Taki sposób sterowania może zostać nazwany metodą sterowania kompensatora sygnałem konduktancji zastępczej obciążenia (sterowaniem kompensatora sygnałem konduktancyjnym).

W strukturze zależności (2.1) jawnie widoczna jest oczywista idea kompensacji jako utrzymywanie w linii zasilającej minimalnej normy prądu, niezbędnej do przenoszenia zadanej mocy. Jednak bezpośrednie użycie tej zależności może być obarczone istotną wadą: sygnał konduktancyjny $g(t)$ może być zmienny w czasie nawet w obwodzie o przebiegach sinusoidalnych. Wystarczy, że nie będzie zachowana symetria napięć fazowych linii. W takim przypadku wzorzec prądów linii zostanie odkształcony. Oczywiście jest, że pojawienie się odkształceń w przebiegach napięć linii powoduje dodatkowe odkształcenie wzorca prądów.

W monografii przyjęto uzyskiwanie sygnału wzorcowego metodę pośrednią. Wybór taki umożliwia stworzenie jednolitego algorytmu uzyskiwania sygnału wzorcowego niezależnie od rodzaju obwodu, w którym kompensator pracuje (obwód DC, AC, wielofazowy).

Efekt inercji, związany z użyciem kondensatora (albo indukcyjności) jako „sensora” przebiegu wejściowego, zostanie wykorzystany do rozszerzenia własności kompensatora o możliwość regulacji przepływu mocy czynnej pomiędzy linią a obciążeniem. Dodatkowo uzyskiwany jest efekt dolnoprzepustowej filtracji sygnału wejściowego, co zmniejsza składową zmienną w sygnale konduktancyjnym.

Metoda pośrednia umożliwia również redukcję liczby sensorów pomiarowych praktycznie do jednego, mierzącego napięcie (albo prąd) głównego zasobnika energii kompensatora. Pozwala to uprościć obwód sterujący kompensatora, w szczególności pracującego w układzie wielofazowym.

Omawiana metoda sterowania kompensatorem może być również sklasyfikowana jako metoda pośrednia, tu jednak w nieco innym znaczeniu niż podanym wcześniej. Prąd kompensujący nie jest wyznaczany w sposób jawny, a regulacji podlega prąd linii zasilającej. Tak więc realizacja prądu kompensującego dokonywana jest przy użyciu sygnału pośredniego, tu sygnału prądu aktywnego obciążenia, będącego w tym rozwiązaniu sygnałem wzorcowym. Dostosowując prąd linii do wzorca, kompensator generuje pozostałą część prądu obciążenia, będącą jego składową nieaktywną. Tym samym cel kompensacji zostaje osiągnięty, ponieważ na mocy prądowego prawa Kirchhoffa składowa nieaktywna nie występuje w prądzie linii.

Rozdział 2. Prądy Fryzego

Rozdział zawiera dyskusję możliwości kompensacji prądu nieaktywnego w oparciu o koncepcję konduktancji zastępczej obciążenia według Fryzego.

Na podstawie studiów literaturowych stwierdzono, że sygnał konduktancyjny – jako element teorii mocy lub algorytmu sterowania kompensatorem – przewija się w sposób mniej lub bardziej jawny w różnych opracowaniach. Początki sięgają prac Fryzego z roku 1931, będących kontrpropozycją wobec ogłoszonej nieco wcześniej teorii C. Budeanu. Wydaje się, że główną intencją Fryzego było sformułowanie generalnej zasady, że co nie jest mocą czynną musi przynależeć do szeroko rozumianej mocy biernej. Konsekwentnie, rozumowanie to można zastosować do rozkładu prądu obciążenia na składową aktywną i nieaktywną. Podejście takie może być inspirujące przy określaniu celu i doborze technik kompensacyjnych.

Rozwinięcie koncepcji Fryzego zostało dokonane przez Depenbrocka, przy uwzględnieniu wprowadzonych wcześniej przez Buchholza pojęć zastępczej wartości skutecznej napięcia i prądu źródła wielofazowego. Rozwinięcie Depenbrocka znane jest jako teoria FBD. Wprowadza ona szereg nowych pojęć i definicji, z których uwagę zwraca pojęcie mocy o złożonej nazwie i charakterze: *collective instantaneous apparent powerless power* (por. Staudt V.: *Fryze – Buchholz – Depenbrock: a time-domain power theory*, Przegląd Elektrotechniczny, Vol. 84, Nr 6, 2008).

Inspirację koncepcją Fryzego można odnaleźć również w powszechnie znanym algorytmie sterowania filtrami aktywnymi, opartym na tak zwanej teorii mocy chwilowych pq . Jest on dokładnie omówiony na przykład w pracy: Akagi H., Watanabe E., Aredes M.: *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*, IEEE Press, Wiley & Sons, 2007. Można tam doszukać się „sygnału konduktancyjnego”, jako ilorazu mocy chwilowej obciążenia i pewnych formuł, które mogą być interpretowane jako chwilowe normy napięć zasilających, por. podane tam zależności, na przykład (3.23), (3.106) oraz (3.127).

Określane przy użyciu sygnału konduktancyjnego składowe aktywna i nieaktywna prądu obciążenia mają sens nie tylko w obwodach jedno i wielofazowych, ale również w obwodach zasilanych ze źródła napięcia stałego. Zatem kompensacja prądu nieaktywnego przy użyciu sygnału konduktancyjnego posiada walor pewnej uniwersalności.

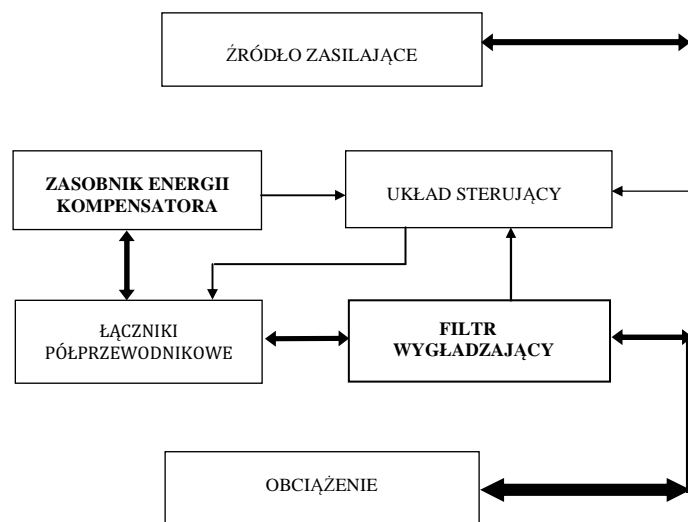
Rozdział 3. Konduktancyjny sygnał sterowania kompensatorem

Rozdział 3. ma kluczowe znaczenie dla prezentowanego osiągnięcia naukowego. Przedstawiono oryginalną, ogólną formułę, pozwalającą wyrazić sygnał konduktancji zastępczej dowolnego obciążenia – w tym nieliniowego i/lub niestacjonarnego, zasilanego napięciem stałym lub przemiennym, jedno

lub wielofazowym. Po raz pierwszy formuła ta została zaprezentowana w artykule: Szromba A., *Conductance-controlled global-compensation-type shunt active power filter*, Arch. of Electr. Eng., vol. 64, nr 2, 2015, pp. 259-275. Formuła ogólna pozwala określić sygnał konduktancyjny w funkcji energii zgromadzonej w przekształtniku kompensatora – falowniku napięcia lub falowniku prądu. Pokazano przekształcenie postaci ogólnej sygnału konduktancyjnego do postaci odcinkami stałej, która może być uznana za formę docelową sterowania kompensatorem. Istotne jest, że metoda sterowania kompensatorem, oparta na wprowadzonej formule, umożliwi rozszerzenie użyteczności kompensatora o funkcję regulatora przepływu mocy czynnej w obwodzie.

W celu ułatwienia śledzenia treści zachowano zgodność numeracji rysunków i wzorów z numeracją stosowaną w monografii.

W skład układu kompensatora, rysunek 3.1, wchodzi cztery bloki: ZASOBNIK ENERGII KOMPENSATORA, UKŁAD STERUJĄCY, ŁĄCZNIKI PÓŁPRZEWODNIKOWE oraz FILTR WYGŁADZAJĄCY. Sygnał konduktancyjny otrzymywany jest na podstawie obserwacji zmian energii zgromadzonej w przekształtniku: w bloku oznaczonym jako ZASOBNIK ENERGII KOMPENSATORA oraz w bloku FILTR WYGŁADZAJĄCY.



Rys. 3.1 Schemat blokowy kompensatora sterowanego metodą pośrednią

Przyjęto założenie, że w celu uzyskania formuły sygnału konduktancji zastępczej obciążenia można wykorzystać inercję odpowiedzi kompensatora wobec zmiany mocy obciążenia. Inercja ta jest związana z niezerowym czasem zmian energii w ZASOBNIKU ENERGII KOMPENSATORA oraz w FILTRZE WYGŁADZAJĄCYM. Ogólną postać formuły sygnału konduktancyjnego uzyskano na podstawie analizy odpowiedzi kompensatora na skokową zmianę mocy czynnej obciążenia.

Ciągły sygnał konduktancyjny, postać energetyczna (ogólna)

Analizie poddany jest obwód o ogólnej strukturze pokazanej na rysunku 3.1. W chwili $t_0 = 0$ następuje włączenie obciążenia o mocy czynnej P_R . Bilans energii w obwodzie opisany jest następująco:

$$(P_R + P_{AF})t = (W_{AF0} - w_{AF}(t)) + \sum_{n=1}^k \int_0^t u_n(t) i_{S,n}(t) dt' \quad (3.1.8)$$

gdzie: P_R – moc czynna obciążenia,
 P_{AF} – moc rozpraszana w kompensatorze,
 W_{AF0} – energia wprowadzona wstępnie do zasobnika energii kompensatora,
 $w_{AF}(t)$ – energia chwilowa zgromadzona w zasobniku energii kompensatora,
 k – liczba faz obwodu,
 $u_n(t)$ – napięcie chwilowe fazy n linii (źródła),
 $i_{S,n}(t)$ – prąd chwilowy fazy n linii (źródła).

W stanie nieustalonym, czyli w przedziale $[0, T_{st}]$, obciążenie czerpie energię zarówno z kompensatora jak i z linii. Natomiast w stanie ustalonym całość energii jest dostarczana już tylko z linii. Biorąc pod uwagę, że zmiana energii kompensatora ΔW_{AF} oraz energia W_S pobrana z linii w przedziale $[0, T_{st}]$ nie są sobie równe, zdefiniowano parametr N_{SK} , który określa iloraz tych energii:

$$N_{SK} = \frac{W_S [0, T_{st}]}{\Delta W_{AF} [0, T_{st}]} \quad (3.1.10)$$

gdzie: N_{SK} - krotność przewagi energii pobranej ze źródła (linii) nad zmianą energii kompensatora podczas trwania stanu nieustalonego.

$\Delta W_{AF} = W_{AF0} - w_{AF}(T_{st})$ - zmiana energii zgromadzonej w kompensatorze w przedziale czasu $[0, T_{st}]$,

T_{st} - czas dochodzenia obwodu do stanu ustalonego.

Wykazano, że parametr (3.1.10) może być sprowadzony do zależności:

$$N_{SK} = \frac{N_\tau}{1 - e^{-N_\tau}} - 1 \quad (3.1.12)$$

gdzie N_τ określa liczbę stałych czasowych τ po których następuje stan ustalony, $T_{st} = \tau N_\tau$.

Równanie (3.1.9), określające rozkład pracy i energii w obwodzie, można teraz przedstawić w funkcji zmiany energii zgromadzonej w kompensatorze:

$$T_{st} (P_R + P_{AF}) = \Delta W_{AF} + W_S = \Delta W_{AF} + \Delta W_{AF} N_{SK} = \Delta W_{AF} (N_{SK} + 1) \quad (3.1.13)$$

stąd sygnał konduktancji zastępczej układu obciążenie-kompensator w stanie ustalonym wynosi:

$$g(T_{st}) = G_R + G_{AF} = \Delta W_{AF} \frac{N_{SK} + 1}{T_{st} U_\Sigma^2} \quad (3.1.14)$$

gdzie $U_\Sigma = \sqrt{\sum_{n=1}^k U_n^2}$ jest skutecznym napięciem zastępczym linii według Buchholza,.

Na podstawie zależności (3.1.8) i (3.1.14) można zapisać ogólną formułę określającą przebieg sygnału konduktancyjnego $g(t)$:

$$g(t) = \frac{\Delta W_{AF} (N_{SK} + 1)}{T_{st} U_\Sigma^2} = \frac{(W_{AF0} - w_{AF}(t))(N_{SK} + 1)}{T_{st} U_\Sigma^2} \quad (3.1.15)$$

Ciągły sygnał konduktancyjnego, postać implementacyjna dla kompensatora z falownikiem napięcia

Formuła (3.1.15) ma charakter ogólny, możliwy do zastosowania w przypadku użycia do budowy kompensatora zarówno falownika napięcia jak i falownika prądu. Dla kompensatora zbudowanego w oparciu o falownik napięcia uwzględnienie zależności określających ilość energii zgromadzonej w jego elementach inercyjnych prowadzi do następującego przekształcenia wyrażenia (3.1.15):

$$g(t) = \frac{\left(C(U_{C0}^2 - u_C^2(t)) + \sum_{n=1}^k L_n (i_{AF0,n}^2 - i_{AF,n}^2(t)) \right) (N_{SK} + 1)}{2T_{st} U_\Sigma^2} \quad (3.1.17)$$

gdzie: U_{C0} - początkowe napięcie kondensatora kompensatora,
 $i_{AF0,n}$ - początkowe prądy indukcyjności poszczególnych faz kompensatora,
 $u_C(t)$ - chwilowe napięcie kondensatora kompensatora,
 $i_{AF,n}(t)$ - chwilowe prądy indukcyjności poszczególnych faz kompensatora.

Wygodne jest wyodrębnienie w równaniu (3.1.17) pewnych stałych współczynników, oznaczonych jako K_U oraz $K_{I,n}$:

$$g(t) = K_U (U_{C0}^2 - u_C^2(t)) + \sum_{n=1}^k K_{I,n} (i_{AF0,n}^2 - i_{AF,n}^2(t)) \quad (3.1.18)$$

$$\text{gdzie: } K_U = \frac{C(N_{SK} + 1)}{2T_{st}U_{\Sigma}^2} \quad \text{oraz} \quad K_{I,n} = \frac{L_n(N_{SK} + 1)}{2T_{st}U_{\Sigma}^2}$$

W tym miejscu należy podać dwie istotne uwagi:

- 1) Dla przyjętych na etapie projektowania obwodów mocy kompensatora pojemności C , indukcyjności L oraz stałej N_{SK} , możliwy jest dobór pożądanej dynamiki kompensatora poprzez zadanie wartości parametru T_{st} .
- 2) Stałe K_U oraz $K_{I,n}$ mogą zostać użyte jako współczynniki wzmocnienia regulatorów typu P , umieszczonych w torze obliczania sygnału konduktancyjnego $g(t)$.

Odcinkami stały sygnał konduktancyjny, postać energetyczna (ogólna)

Kompensacja prądu nieaktywnego związana jest z wymianą energii między kompensatorem a linią. Powoduje to pojawienie się składowej zmiennej w sygnale konduktancyjnym, por. zal. (3.1.15). Wzorzec prądu aktywnego ulega wtedy odkształceniu, por. zal. (2.1). Niedogodność tę można wyeliminować stosując algorytm pracy kompensatora z sygnałem konduktancyjnym odcinkami stałym. Implementacja takiego trybu pracy może przebiegać następująco: Można przyjąć, że kompensator powinien osiągnąć stan ustalony po jednym okresie T przebiegu napięcia linii, czyli $T_{st}=T$. Wtedy całość pracy obciążenia podczas dochodzenia do stanu ustalonego pochodzi z kompensatora, zatem $N_{SK} = 0$, por. zal. (3.1.10). Stąd na końcu pierwszego okresu T_1 pracy kompensatora sygnał konduktancji zastępczej osiąga wartość:

$$g(T_{st}) = g(T) = G_{T1} = \frac{\Delta W_{AF}}{TU_{\Sigma}^2} = \frac{W_{AF0} - W_{AF}(T)}{TU_{\Sigma}^2} \quad (3.2.3)$$

Jeżeli moc czynna obciążenia jest stała, wtedy sygnał konduktancyjny w każdym kolejnym okresie T też jest stały: $G_{1T} = G_{mT}$, gdzie m jest indeksem okresu T , $m = 1, 2, 3, \dots$.

W przypadku obciążenia o zmiennej mocy czynnej wielkość energii zgromadzonej w kompensatorze na końcu dowolnego okresu T jest różna od wielkości na końcu okresu poprzedniego. Jest to skutkiem utrzymywania w okresie T_m stałej wartości sygnału konduktancyjnego, równego wartości G_{m-1} z okresu T_{m-1} . W konsekwencji, w dowolnym okresie T_m energia dostarczana do obciążenia wynika z pracy obciążenia wykonanej w poprzednim okresie T_{m-1} . Wynikające stąd różnice energii każdorazowo bilansuje kompensator. W konsekwencji, w dowolnym okresie T_m będzie miał zastosowanie sygnał konduktancji zastępczej uzyskany przez próbkowanie i zapamiętywanie chwilowej wartości sygnału konduktancyjnego na samym końcu każdego okresu poprzedniego T_{m-1} , co prowadzi do zależności:

$$G_{Tm} = g(T_{m-1}) = \frac{W_{AF0} - W_{AF}(T_{m-1})}{TU_{\Sigma}^2} \quad (3.2.5)$$

gdzie T_{m-1} oznacza ostatnią chwilę okresu o indeksie $m - 1$.

Również przebieg prądu linii można zapisać w postaci akcentującej to przesunięcie:

$$i_{S,Tm}(t) = G_{T(m-1)} u_S(t)$$

Odcinkami stały sygnał konduktancyjny, postać implementacyjna dla falownika napięcia

W przypadku kompensatora zbudowanego z wykorzystaniem falownika napięcia, odcinkami stały sygnał konduktancyjny można otrzymać z połączenia zależności (3.1.17) oraz (3.2.5):

$$G_{T_m} = \frac{C(U_{C0}^2 - u_C^2(T_{m-1})) + \sum_{n=1}^k L_n (i_{AF0,n}^2 - i_{AF,n}^2(T_{m-1}))}{2TU_{\Sigma}^2} \quad (3.2.6)$$

gdzie: U_{C0} – początkowe napięcie kondensatora kompensatora,
 $i_{AF0,n}$ – początkowe prądy indukcyjności poszczególnych faz kompensatora,
 $u_C(T_{m-1})$ – napięcie kondensatora kompensatora na końcu okresu T_{m-1} ,
 $i_{AF,n}(T_{m-1})$ – prądy indukcyjności faz kompensatora na końcu okresu T_{m-1} .

Podobnie jak w przypadku zależności (3.1.18) również zależność (3.2.6) można zapisać z użyciem współczynników proporcjonalności K_U oraz $K_{L,n}$ w postaci:

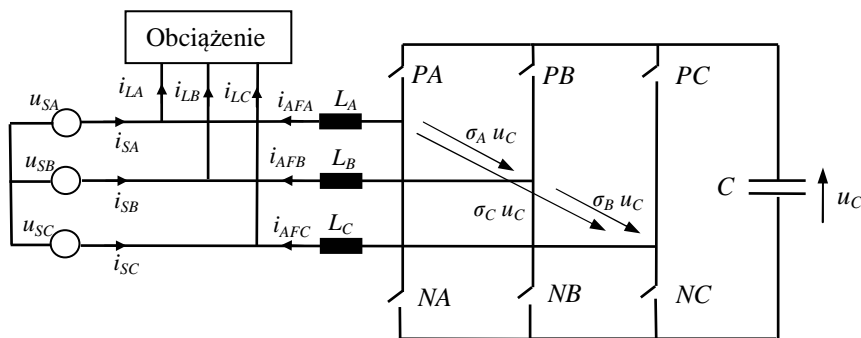
$$G_{T_m} = K_U (U_{C0}^2 - u_C^2(T_{m-1})) + \sum_{n=1}^k K_{L,n} (i_{AF0,n}^2 - i_{AF,n}^2(T_{m-1})) \quad (3.2.7)$$

gdzie: $K_U = \frac{C}{2T_{st}U_{\Sigma}^2}$ oraz $K_{L,n} = \frac{L_n}{2T_{st}U_{\Sigma}^2}$

Rozdział 4. Elementy budowy i sterowania kompensatorem

W rozdziale 4. zawarto opis sposobu obliczania elementów inercyjnych kompensatora. Ich dobór jest istotny, ponieważ ich praca odgrywa kluczową rolę w obliczaniu sygnału konduktancyjnego. Przedstawiono również możliwości uproszczeń podstawowych wariantów formuły sygnału konduktancyjnego, przedstawionych w rozdziale 3.

Na rysunku 4.1 przedstawiono strukturę obwodu mocy badanego kompensatora. Wyróżniono zasobnik energii w postaci kondensatora C ; łączniki PA, NA, PB, NB, PC, NC , które zmieniają polaryzację napięcia kondensatora C względem pozostałej części obwodu; oraz indukcyjności L_A, L_B, L_C .



Rys. 4.1 Schemat obwodu mocy kompensatora wraz z obwodem źródła i obciążenia

Przełączanie biegunowości napięcia kondensatora C może być zilustrowane przy pomocy współczynników przełączeń σ_A, σ_B i σ_C . Mogą one przyjmować wartość $+1, -1$ lub 0 . Z wartościami tymi związany jest odpowiedni stan łączników kompensatora.

Indukcyjności dławików wejściowych kompensatora

Do kształtowania prądu linii użyto regulatorów histerezowych. Stosując założenia upraszczające: 1) wszystkie dławiki kompensatora są identyczne, 2) możliwość wystąpienia większej stromości prądów faz obciążenia w stosunku do stromości prądów faz kompensatora jest ignorowana, 3) indukcyjności faz linii są pomijalne w stosunku do indukcyjności dławików faz kompensatora - związek pomiędzy stromością narastania/opadania prądu linii w fazach $n1n2$ można opisać zależnością:

$$\frac{di_{S,n1n2}(t)}{dt} = \frac{u_{S,n1n2}(t) + \sigma u_C(t)}{2L} \quad (4.1.1)$$

W wyniku przekształceń zależności (4.1.1) można otrzymać, że wymagana indukcyjność każdego z dławików kompensatora wynosi:

$$L = \frac{u_{C,\max}}{8\Delta I f_{sw,\max}} \quad (4.1.4)$$

gdzie: $u_{C,\max}$ – maksymalne napięcie kondensatora kompensatora,
 ΔI – szerokość pętli regulatora histerezy,
 $f_{sw,\max}$ – przyjęta maksymalna częstotliwość pracy łączników.

Pojemność kondensatora kompensatora

Obliczenie wymaganej pojemności kondensatora wymaga rozpatrzenia procesu włączenia obciążenia. Początkowo jest ono w całości zasilane przez kompensator. W stanie nieustalonym zasilanie stopniowo przejmowane jest przez linię. Następuje spadek energii zgromadzonej w kondensatorze C oraz pewne jej zmiany w indukcyjnościach L_n . Wymaganą pojemność i napięcie początkowe kondensatora należy określić w taki sposób, aby zapewnić wystarczającą ilość energii do zasilania obciążenia w stanie nieustalonym. Zakładając, że: 1) G_{\max} jest maksymalną konduktancją zastępczą danego obciążenia; 2) napięcie kondensatora nie może spaść poniżej pewnej minimalnej wartości, na przykład $u_{C\min} = u_C(T_{st})$ – można obliczyć wymaganą pojemność C poprzez przekształcenie zależności (3.1.17) do postaci:

$$C = \frac{2T_{st}U_{\Sigma}^2G_{\max} + (N_{SK} + 1)\sum_{n=1}^k L_n (i_{AF0,n}^2(t) - i_{AF,n}^2(T_{st}))}{(N_{SK} + 1)(U_{C0}^2 - u_C^2(T_{st}))} \quad (4.2.2)$$

Rozpatrując sygnał odcinkami stały należy w zależności (4.2.2) przyjąć $N_{sk}=0$ oraz $T_{st}=T$.

Uproszczenia formuły sygnału konduktancyjnego

W punkcie 4.3 monografii przedstawiono oszacowania liczbowe dla pewnego reprezentatywnego obwodu źródło–kompensator–obciążenie. Wnioski są następujące: zmiany energii gromadzonej w indukcyjnościach, por. zal. (3.1.17), mogą zostać pominięte. W konsekwencji zależności (3.1.17) oraz (3.1.18) mogą być uproszczone do postaci:

$$g(t) = \frac{C(U_{C0}^2 - u_C^2(t))(N_{SK} + 1)}{2T_{st}U_{\Sigma}^2} \quad \text{oraz} \quad g(t) = K_U (U_{C0}^2 - u_C^2(t))$$

Identyczne uproszczenie w układzie z sygnałem odcinkami stałym prowadzą do zależności:

$$G_{Tm} = \frac{C(U_{C0}^2 - u_C^2(T_{m-1}))}{2TU_{\Sigma}^2} \quad \text{oraz} \quad G_{Tm} = K_U (U_{C0}^2 - u_C^2(T_{m-1}))$$

Aproksymacja formy kwadratowej sygnału konduktancyjnego przybliżeniem liniowym

Możliwość taka pojawia się, jeżeli dla każdego z napięć $u_C(t)$ z zakresu $(u_{C\min}, U_{C0})$ zachodzi:

$$K_U (U_{C0}^2 - u_{C\min}^2) \approx K_{U*} (U_{C0} - u_{C\min}) \quad (4.3.7)$$

Jeśli ten warunek jest spełniony, to można przyjąć:

$$g(t) = K_{U*} (U_{C0} - u_C(t)) \quad \text{oraz} \quad G_{Tm} = K_{U*} (U_{C0} - u_C(T_{m-1}))$$

$$\text{gdzie:} \quad K_{U*} \approx K_U \frac{U_{C0}^2 - u_{C\min}^2}{U_{C0} - u_{C\min}} = U_{C0} + u_{C\min} \quad (4.3.8)$$

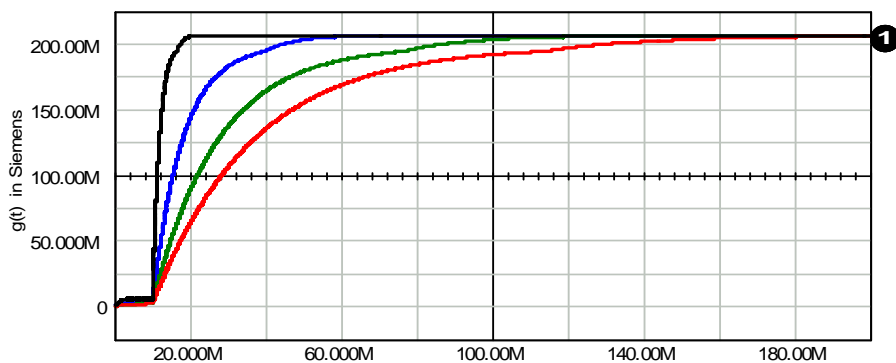
W kolejnych rozdziałach 5 – 8 przedstawiono symulacyjną weryfikację sterowania kompensatorem. Symulacje prowadzono przy użyciu pakietu IsSpice.

Rozdział 5. Kompensator w obwodzie zasilanym ze źródła napięcia stałego

Rozdział 5. jest stosunkowo obszerny, ponieważ w sposób szczegółowy opisano w nim ideę główną oraz wszystkie warianty omawianej metody sterowania. Ze względu na jej uniwersalny charakter, który można streścić jako metodycznie jednolity proces uzyskiwania sygnału konduktancji zastępczej obciążenia oraz sygnału prądu wzorcowego, rezultaty osiągnięte w obwodzie zasilanym napięciem stałym wykazują wyraźne związki z obwodami zasilanymi napięciami o innych przebiegach.

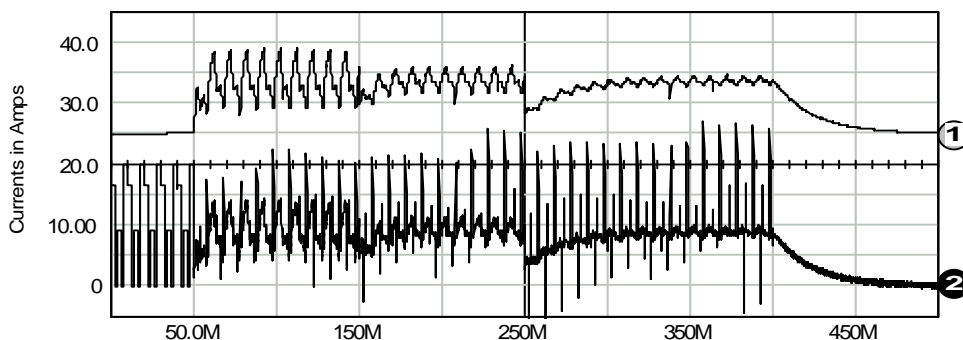
Dodatkowym uzasadnieniem podjęcia tematu kompensacji w obwodzie zasilanym napięciem stałym jest prawdopodobny wzrost rynku urządzeń zasilanych z paneli fotowoltaicznych, ogniw paliwowych, czy różnego rodzaju akumulatorów. Można spodziewać się narastającego zainteresowania urządzeniami służącymi poprawie jakości zasilania w obwodach tego rodzaju oraz możliwym związkiem jakości zasilania z trwałością i niezawodnością stałonapięciowych źródeł energii.

Rysunek 5.11 ilustruje pewien przykład prowadzonych badań. Przedstawiono na nim zestaw charakterystyk sygnału konduktancyjnego $g(t)$ dla kolejnych wartości parametru T_{st} , zadającego czas osiągnięcia stanu ustalonego po zmianie mocy obciążenia, równych kolejno: 10ms, 50ms, 110ms oraz 170ms, w kolejności kolorów odpowiednio: czarny, niebieski, zielony oraz czerwony. Znaczenie parametru T_{st} jest istotne nie tylko ze względu na jego zastosowania w kształtowaniu charakterystyki kompensatora, ale również dla poszerzenia jego funkcjonalności jako regulatora przepływu mocy czynnej – por. rozdział 9.



Rys. 5.11 Przebieg sygnału $g(t)$ dla różnych wartości czasu T_{st} .

Na rysunku 5.22 przedstawiono przykładowy efekt modyfikowania parametru T_{st} na przebiegu sygnału wzorcowego, przebieg numer 1, oraz na przebiegu otrzymywanego na tej podstawie prądu linii, przebieg numer 2. W przedziale czasu 0-50ms w przebiegu numer 2 widoczny jest przebieg prądu linii przed włączeniem kompensatora. Nie ulega on żadnej modyfikacji aż do wyłączenia obciążenia w chwili $t=400$ ms. Kompensator zostaje uruchomiony w chwili $t=50$ ms. Można zauważyć, że zwiększanie parametru T_{st} powoduje spadek amplitudy składowej zmiennej sygnału wzorcowego, przy oczywistym zachowaniu jego wartości średniej, por. zal. (3.1.14).



Rys. 5.22 Przebieg numer 1: Sygnał wzorcowy prądu aktywnego dla parametru T_{st} równego w kolejnych przedziałach czasu 50ms-150ms, 150ms-250ms oraz 250ms-400ms. Parametr T_{st} wynosi kolejno: 20ms, 50ms oraz 150ms. Przebieg numer 2: Prąd linii, będący realizacją powyższego wzorca prądu aktywnego.

W końcowej części rozdziału zbadano możliwość pracy kompensatora z pewnym mechanizmem samoregulacji, pozwalającym na zmniejszenie odchyżeń prądu linii względem wartości średniej, czyli jego składowej czynnej. Zaproponowano rozwiązanie polegające na bieżącej regulacji parametru T_{st} względem zmienności mocy obciążenia.

Rozdział 6. Kompensator jednofazowy

W rozdziale 6. weryfikowano pracę kompensatora w obwodzie jednofazowym. Potwierdzono aktualność głównych cech metody, zweryfikowanych już w rozdziale 5. dla obwodu zasilanego napięciem stałym. Dodatkowo przedstawiono możliwości: 1) uzupełniania do wielkości początkowej energii zgromadzonej w kondensatorze kompensatora, 2) stabilizacji częstotliwości impulsowania łączników falownika kompensatora, 3) redukcji maksymalnej częstotliwości impulsowania tych łączników. Rozdział 6. monografii zawiera rozszerzenie pracy doktorskiej autora o badania związane z sygnałem konduktancyjnym ciągłym. Zaprezentowana w rozdziale 3. monografii formuła sygnału ciągłego, a tym bardziej jej związek z sygnałem odcinkami stałym, na którym opierała się praca doktorska, nie był jeszcze znany w trakcie tworzenia tejże pracy. Osiągnięcia pracy doktorskiej autora zostały włączone w monografię ze względu na potrzebę zachowania jej spójności merytorycznej.

Rozdział 7. Kompensator trójfazowy w układzie trójprzewodowym

Kompensacja w obwodzie trójfazowym trójprzewodowym ma duże znaczenie praktyczne ze względu szerokie rozprzestrzenienie tego typu obwodów. Ogólna struktura obwodu została pokazana na rysunku 4.1. Poza możliwością powodowania przesunięcia przebiegu prądu względem napięcia, wywoływania przepływu prądów odkształconych oraz nieokresowych, obciążenia trójfazowe mogą powodować niesymetrię prądów oraz różne kombinacje tych przypadków. Metoda sterowania z wykorzystaniem sygnału konduktancyjnego umożliwia jednolity mechanizm kompensacji wszystkich składowych nieaktywnych prądu. Na uwagę zasługuje uzyskiwanie w sposób naturalny symetrii prądów linii.

Zarówno w procesie obliczania sygnału konduktancyjnego jak i w celu uzyskania liczbowych wskaźników jakości kompensacji, na przykład współczynnika mocy źródła, przyjęto wielkości zastępcze (normy) napięć i prądów fazowych według propozycji Buchholza. Uzasadnienie takiego wyboru wynika z adekwatnego – w tym przypadku – powiązania pogorszenia wielkości współczynnika mocy ze wzrostem strat mocy w linii.

Działanie kompensatora trójfazowego zostało wstępnie zweryfikowane zgodnie ze schematem postępowania zastosowanym w rozdziale 5. i 6. Otrzymywane przebiegi napięć i prądów były zgodne z przewidywaniami wynikającymi z formuł omawianych w rozdziale 3.

W dalszej części rozdziału badano kompensowanie obciążeń niesymetrycznych i nieliniowych. Obserwowano wzrost wartości współczynnika mocy oraz spadek wartości współczynnika odkształcenia THD_I . Potwierdzone zostało, że eliminacja z sygnału konduktancyjnego składowej zmiennej, co jest osiągnięte poprzez stosowanie sygnału konduktancyjnego odcinkami stałego, prowadzi do poprawy obu tych współczynników. Wykazano, że zredukowanie odkształcenia prądu linii w momentach wprowadzania kolejnych wartości sygnału konduktancyjnego może nastąpić poprzez zwiększenie parametru T_{st} .

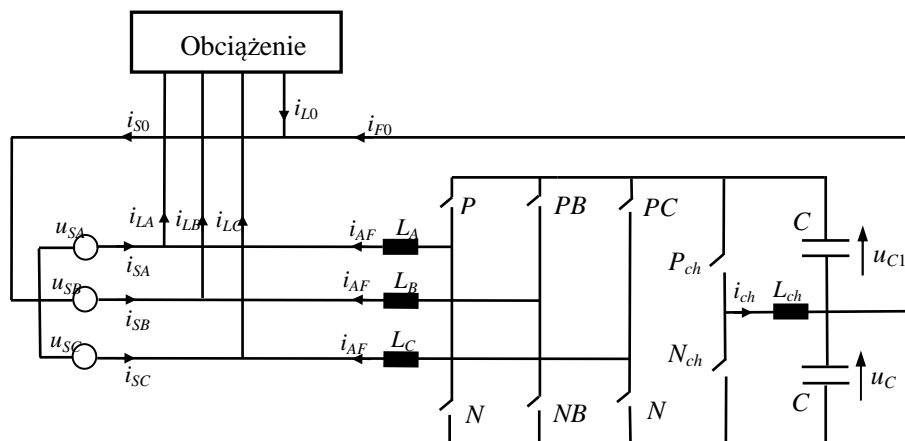
W końcowej części rozdziału przeanalizowano pracę kompensatora w warunkach odkształceń i asymetrii napięć fazowych linii. Przedyskutowano zagadnienia związane z pojawiającymi się wtedy trudnościami w otrzymywaniu prawidłowego sygnału konduktancyjnego. Trudności te nasilają się przy wzroście rezystancji i indukcyjności linii. W szczególności omówiono:

- wpływ odkształceń napięcia linii na synchronizację ekstrapolatora kompensatora,
- wpływ odkształcenia napięć fazowych linii na odkształcenia sygnału konduktancyjnego oraz sygnałów wzorcowych prądów fazowych linii,
- wpływ odkształcenia i asymetrii przebiegów napięć fazowych linii na wahania jego wartości zastępczej.

We wszystkich trzech przypadkach możliwe jest rozwiązanie wymienionych problemów w drodze dolnoprzepustowej filtracji napięcia linii, z ewentualnym uzupełnieniem poprzez użycie techniki synchronizacji pętli fazowej. Natomiast w przypadku drugim i trzecim wystarczające może być zwiększenie wartości parametru T_{st} .

Rozdział 8. Kompensator trójfazowy w układzie czteroprzewodowym

Kompensacja prądów nieaktywnych w obwodzie trójfazowym czteroprzewodowym, rysunek 8.17, wymaga eliminacji odkształceń i symetryzacji prądów linii oraz zerowania prądu w jej przewodzie neutralnym. W monografii wykazano, że kompensator sterowany sygnałem konduktancyjnym może spełnić te wymagania. Uzyskane rezultaty zostały przedstawione również w artykule: Szromba A.: *Three-phase four-wire shunt active power filter working simultaneously as energy conditioner*, COMPEL, vol. 36, iss. 3, 2017, pp. 702-715.



Rys. 8.17. Kompensator z dodatkowym obwodem równoważenia napięć kondensatorów C_1 i C_2 .

W układzie czteroprzewodowym może wystąpić potrzeba równoważenia napięć kondensatorów C_1 i C_2 . Jeżeli obciążenie wywołuje wystąpienie składowej stałej w prądzie przewodu neutralnego, podjęcie jej kompensowania bez zmiany algorytmu sterowania lub dodatkowych środków sprzętowych, prowadzi do wzajemnie przeciwstawnego narastania/opadania napięć kondensatorów C_1 i C_2 . Suma zmian ich energii jest zerowa, ponieważ w obwodach napięć sinusoidalnych składowa stała prądu nie niesie mocy czynnej. Pojawianie się lub zanikanie składowej stałej w przewodzie neutralnym nie spowoduje więc zmiany wartości sygnału konduktancyjnego. Natomiast narastanie różnicy napięć kondensatorów może sprowadzić napięcie jednego z nich do wielkości bliskiej amplitudzie napięcia linii. Następuje wtedy utrata kontroli kompensatora nad prądami linii, co prowadzi do ich odkształceń.

Rozpatrzono dwie metody równoważenia napięć kondensatorów. Istotne jest, że kompensator nadal może być sterowany z wykorzystaniem sygnału konduktancyjnego. Pierwszą metodę można nazwać oszczędnościową, ponieważ nie wymaga uzupełnień sprzętowych. Jednak ceną jest pozostawianie nieskompensowanej składowej stałej w przewodzie neutralnym linii.

Druga metoda umożliwia równoważenie napięć kondensatorów z równoczesną kompensacją składowej stałej w przewodzie neutralnym linii. W tym celu rozbudowano kompensator o obwód przemieszczania ładunku elektrycznego pomiędzy kondensatorami C_1 i C_2 , znany w literaturze jako chopper. Obwód mocy choppera zbudowany jest z dwóch łączników mocy, P_{ch} i N_{ch} oraz indukcyjności L_{ch} , rys. 8.17.

Rozdział 9. Kompensator z równoczesną funkcją buforowania przepływu energii

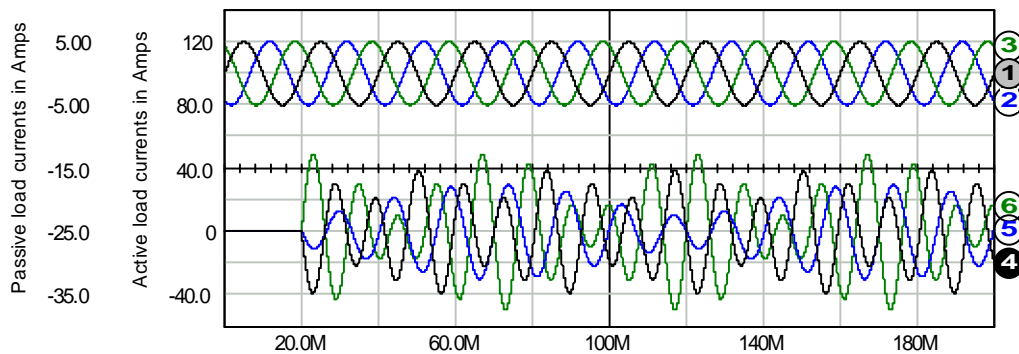
W rozdziale 9. przedstawiono możliwość rozszerzenie funkcjonalności kompensatora o dodatkową funkcję regulacji przepływu mocy czynnej. Jest to unikalna możliwość pracy kompensatora, wynikająca z przyjęcia metody jego sterowania w oparciu o obserwację zmian energii jego elementów inercyjnych. Opracowano i przetestowano różne warianty tej funkcjonalności dla wszystkich omawianych wcześniej układów: z sygnałem konduktancyjnym ciągłym oraz odcinkami stałym, w obwodach typu DC, AC, trójfazowych zarówno trójprzewodowych jak i czteroprzewodowych.

Możliwość zrealizowania dodatkowej funkcji regulatora przepływu energii między źródłem a obciążeniem wynika z inercyjnej odpowiedzi kompensatora na zmiany mocy obciążenia. W monografii opisują to zależności (3.1.14) oraz (3.1.15) – dla ciągłego sygnału konduktancyjnego; oraz (3.2.5) do (3.2.7) – dla sygnału odcinkami stałego. Wynika z nich, że kompensator częściowo uczestniczy w przepływie energii (mocy czynnej) pomiędzy źródłem a obciążeniem. Właściwość ta może zostać rozbudowana i wykorzystana do szerszej regulacji rozptyłu energii w obwodzie.

W przypadku obciążeń zawierających źródła energii – również załączanych po stronie zasobnika energii kompensatora, czyli po jego stronie stałoprądowej – możliwe jest uzyskanie dodatkowych możliwości regulacji przepływu energii. Może być ona w całości, albo w określonej części, gromadzona w zasobniku energii kompensatora. Może być również na bieżąco dystrybuowana na wszystkie obciążenia objęte kompensacyjnym oddziaływaniem kompensatora.

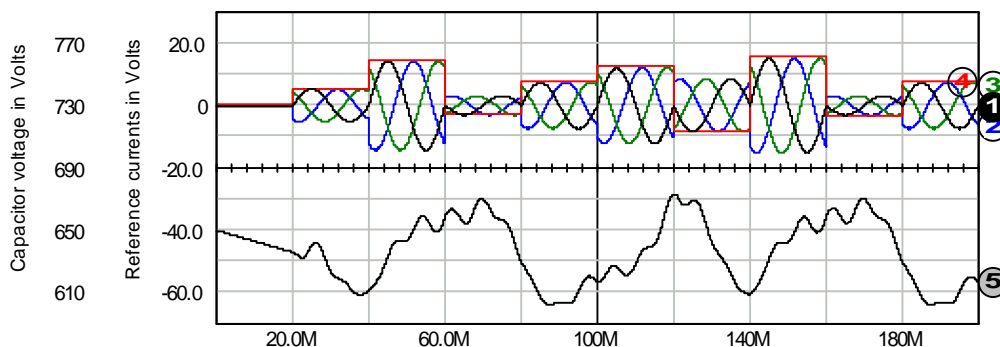
Regulacja przepływu mocy może się odbywać niezależnie od charakteru generowanej w obciążeniach energii – od rozkładu składowych częstotliwościowych, liczby faz czy stopnia asymetrii obwodu. Innymi słowy, dzięki użyciu kompensatora/buforu możliwe jest utworzenie lokalnej grupy obciążeń/generatorów, wzajemnie się zasilających/obciążających, pobierających energię z zewnętrznego źródła jedynie w chwilach lokalnego, czyli wewnątrz grupy, deficytu mocy.

Poniżej przedstawiono syntetyczne podsumowanie badań nad pracą trójfazowego trójprzewodowego kompensatora, wyposażonego w funkcję regulatora przepływu energii. Na rysunku 9.17 pokazano prądy dwóch kompensowanych obciążeń. Pierwsze z nich jest liniowym, symetrycznym, stacjonarnym obciążeniem rezystancyjnym – przebiegi 1, 2 oraz 3. Stanowi ono model grupy obciążeń o stałej mocy czynnej. Drugie z obciążeń jest trójkątowym układem trzech źródeł prądu, pracujących z różnymi częstotliwościami i amplitudami, kolejno: I_{AB} : 60Hz i 10A, I_{BC} : 70Hz i 20A oraz I_{AC} : 90Hz i 30A – przebiegi 4, 5 oraz 6. Stanowi ono model zastępczy grupy obciążeń o zmiennych, nietypowych, trudnych do identyfikacji parametrach.



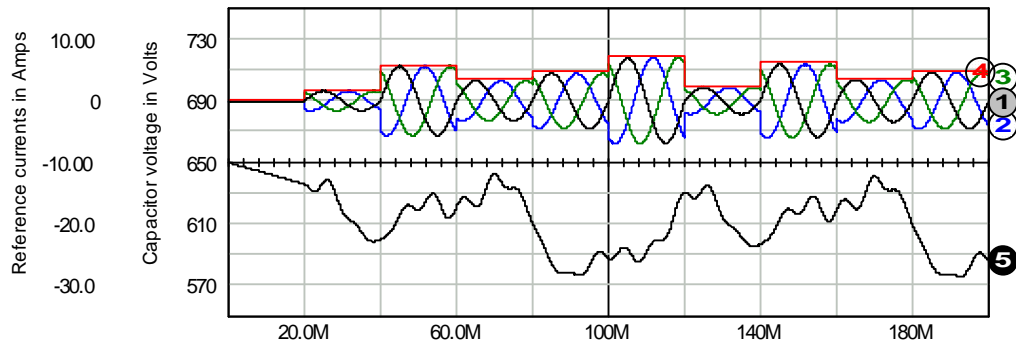
Rys. 9.17 Prąd faz A, B, C obciążenia rezystancyjnego – odpowiednio przebiegi 1, 2, 3, oraz prąd faz A, B, C obciążenia ze źródłami prądowymi – odpowiednio przebiegi 4, 5, 6

Rysunek 9.18 przedstawia prądy wzorcowe faz linii oraz przebieg napięcia kondensatora kompensatora. Symulacje wykonano przy wartości parametru T_{st} równej okresowi T napięcia linii. Zgodnie z oczekiwaniem prądy fazowe linii są symetryczne i współfazowe – lub w fazach przeciwnych, gdy obciążenie jest okresowo aktywne – w stosunku do odpowiednich napięć linii. Obserwację ułatwia nałożony, w formie obwiedni prądów linii, przebieg sygnału konduktancyjnego. Przebieg napięcia kondensatora obrazuje buforowanie zmian mocy obciążenia. Przedziały czasowe spadku napięcia związane są ze wzrostem poboru mocy przez obciążenia. Natomiast przedziały wzrostowe związane są ze spadkiem poboru mocy, a nawet – dla wartości napięcia kondensatora powyżej napięcia początkowego U_{C0} wynoszącego 650V – z generacją mocy w obciążeniach.



Rys. 9.18 Prądy referencyjne faz A, B, C źródła: przebiegi 1, 2, 3; sygnał konduktancyjny: przebieg 4 (skala 30mS/dz) oraz przebieg napięcia kondensatora kompensatora: przebieg 5. Wartość współczynnika $T_{st}=T$

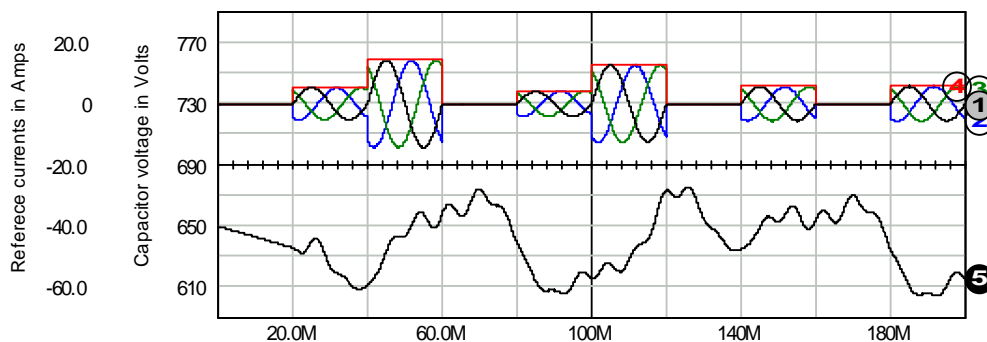
Widoczna na rysunku 9.18 zmienność, z okresu na okres T , amplitud w poszczególnych fazach prądu źródła oraz zmiany kierunku przepływu energii, sugerują możliwość dalszego zmniejszania wielookresowej mocy pozornej źródła. W tym celu można zastosować zwiększenie wartości parametru T_{st} . Na rysunku 9.19 pokazano efekt trzykrotnego zwiększenia T_{st} .



Rys. 9.19 Prąd faz A, B, C źródła: odpowiednio przebiegi 1, 2, 3; przebieg napięcia kondensatora filtra: przebieg 4 (skala 15mS/dz). Wartość współczynnika $T_{st}=3T$

Konsekwencją zwiększenia parametru T_{st} jest spadek napięcia kondensatora kompensatora. Obecnie zawiera się ono w całości poniżej wartości początkowej U_{C0} . Z tej przyczyny sygnał konduktancyjny nie przechodzi do wartości ujemnych i nie następują okresy transmisji energii w stronę źródła. Oczywiście możliwa jest dalsza stabilizacja mocy czynnej linii poprzez zwiększanie współczynnika T_{st} , jednak kosztem dalszego spadku napięcia kondensatora.

Na rysunku 9.20 przedstawiono inną możliwość sterowania pracą kompensatora. W miejsce wydłużenia czasu osiągnięcia stanu ustalonego zastosowano blokowanie zwrotnego przesyłania energii generowanej w obciążeniu w stronę źródła. W przebiegach pokazanych na rysunku 9.20 widoczne są okresy wzrostu napięcia na kondensatorze, które wynikają z gromadzenia w kompensatorze energii generowanej w obciążeniu. Występują również okresy oddawania energii do obciążenia, widoczne jako okresy spadku napięcia na kondensatorze. Zmienność wielkości i znaku mocy czynnej obciążenia powoduje, że mogą wystąpić okresy T z „nadmiarem” sumy energii generowanej w obciążeniu oraz pobieranej ze źródła - w relacji do mocy rozpraszanej w obciążeniu. Skutkuje to nieregularnym, „impulsowym” obciążaniem linii, z okresami bez poboru energii ze źródła. Zjawisko to można istotnie ograniczyć poprzez zwiększenie parametru T_{st} , co stanowiłoby połączenie obu powyższych technik sterowania.



Rys. 9.20 Prąd faz A, B, C źródła: przebiegi 1, 2, 3; sygnał konduktancyjny zastępczej: przebieg 4 (skala Y 30mS/dz) oraz przebieg napięcia kondensatora filtra: przebieg 5. Parametr T_{st} wynosi 20ms

Podobnie jak kompensator trójfazowy trójprzewodowy, również kompensator w układzie czteroprzewodowym może pełnić równocześnie rolę buforu, regulującego przepływ energii czynnej w obwodzie. Funkcjonalność tę można osiągnąć takimi samymi środkami jak w przypadku kompensatora w układzie trójprzewodowym, to znaczy poprzez wprowadzenie odpowiednich limitów na przebieg sygnału konduktancyjnego, i/lub regulację parametru T_{st} . Nie stwierdzono występowania konfliktu z układem choppera wyrównującego napięcia kondensatorów kompensatora/buforu. Uzyskane rezultaty zostały przedstawione również w artykule: Szromba A., *Three-phase four-wire shunt active power filter working simultaneously as energy conditioner*, COMPEL, vol. 36, iss. 3, 2017, pp. 702-715.

Podsumowanie wyników badań zawartych w monografii – osiągnięciu naukowym

Monografia zawiera opis kompensacji składowych nieaktywnych prądu linii przy użyciu kompensatora sterowanego sygnałem charakteryzującym moc czynną obciążenia: sygnałem konduktancji zastępczej obciążenia (sygnałem konduktancyjnym). Jest on obliczany na podstawie sygnału mocy obciążenia, pośrednio, za pomocą pomiaru energii gromadzonej w elementach inercyjnych kompensatora.

Przyjęcie jako sygnału wzorcowego wielkości związanej z mocą czynną obciążenia, to jest prądu aktywnego obciążenia, pozwala odnieść się bezpośrednio do poprawy współczynnika mocy w obwodzie. Możliwe jest pominięcie skomplikowanych technicznie metod analizy prądu obciążenia poprzez jego rozkład wiele elementów składowych, na przykład według klucza częstotliwościowego. Jest widoczna pewna analogia do pominięcia analizy harmonicznej w metodzie sterowania kompensatorami według teorii mocy chwilowych $p-q$.

Sygnał konduktancyjny otrzymywany jest na podstawie badania bilansu energii w obwodzie. Każda nierównowaga, pomiędzy mocą żadaną przez obciążenie a dostarczaną przez linię, przejmowana jest przez kompensator, a następnie równoważona według zadanej mu algorytmem sterowania trajektorii dochodzenia do stanu ustalonego.

Przedstawiono oryginalną metodę wyznaczania sygnału konduktancyjnego jako sygnału ciągłego, wykorzystującą wartości chwilowych przebiegów napięć i prądów elementów inercyjnych kompensatora. Następnie pokazano, że sterowanie kompensatorem w oparciu o pojęcie klasycznej mocy czynnej, skutkującej trybem pracy kompensatora z sygnałem konduktancyjnym odcinkami stałym, może być interpretowane jako szczególny przypadek ogólnej koncepcji sygnału konduktancyjnego ciągłego.

Wykazano, że poza rolą podstawową, polegającą na kompensowaniu w prądzie linii prądu nieaktywnego obciążenia, istnieje możliwość regulacji przepływu energii pomiędzy linią a obciążeniem (lub grupą obciążeń). Może to przyczynić się do zwiększenia efektywności i jakości pracy obwodów zasilających.

Pokazano, że wyznaczanie sygnału konduktancyjnego na podstawie zmian energii wewnętrznej kompensatora jest niezależne od rodzaju całego obwodu jak i struktury kompensatora, jako układu zbudowanego w oparciu o przekształtnik napięcia albo prądu. Dzięki temu ten sam kompensator, bez zmian sprzętowych, może być stosowany zarówno w obwodach zasilanych ze źródeł stałych, jak i przemiennych jedno i wielofazowych.

Pokazano, że zarówno omawiana metoda sterowania sygnałem konduktancyjnym, jak i działający w oparciu o nią kompensator, są podatne na pewną optymalizację. Opisane w pracy kolejno wprowadzane modyfikacje są wzajemnie niezależne, co umożliwia ich elastyczne stosowanie.

Publikacje związane z monografią

W pewnym zakresie treści zawarte w monografii były prezentowane w czasopismach oraz konferencjach. Ilustrują one proces dojrzewania zagadnienia do opracowania jednolitej formuły wyznaczania sygnału konduktancyjnego. Najważniejsze z tych prac, w porządku chronologicznym, zostały zestawione poniżej:

Szromba A., *A shunt active power filter: Development of properties*, COMPEL, vol. 23, nr 4, 2004, pp. 1146-1162.

Szromba A. *Three-phase shunt active power filter*, 11th EPE - PEMC 2004, Ryga, Łotwa;

Szromba A., *Synchronized active power filter*, IEEE Conf. Compatibility in Power Electronics 2005, Gdańsk, pp. 148-165.

Szromba A., *Sampled method of active power filter control. Part I*, Electrical Power Quality and Utilisation Journal, vol. 11, nr 2, 2005, pp. 91-98.

Szromba A., *Sampled method of active power filter control. Part II*, Electrical Power Quality and Utilisation Journal, vol.12, nr 2, 2006, pp. 16-25.

Szromba A., *Energy controlled shunt active power filter*, COMPEL, vol. 26, nr 4, 2007, pp. 1142-1160.

Szromba A., *Shunt power electronic buffer as active filter and energy flow controller*, Arch. of Electr. Eng., vol. 62, nr 1, 2013, pp. 55-75.

Szromba A., *Shunt active power filter control using signal of load equivalent conductance in asymmetrical three-phase systems under nonsinusoidal conditions*, IEEE Conf. ICSES 2016, Kraków.

Już po wydaniu monografii opublikowane zostały dwa artykuły związane ze sterowaniem kompensatora sygnałem konduktancyjnym:

Szromba A., *Three-phase four-wire shunt active power filter working simultaneously as energy conditioner*, COMPEL, vol. 36, iss. 3, 2017, pp. 702-715.

Szromba A., Mysiński W., *Voltage-source-inverter-based conductance-signal-controlled shunt active power filter*, IEEE Conf. EPE 2017, Warszawa.

Drugim z tych artykułów zawiera test laboratoryjny omawianego kompensatora. Potwierdził on prawidłowość omawianej koncepcji sterowania. Poniżej zamieszczono schemat testowanego modelu laboratoryjnego, rys. 8, a dalej przebiegi prądów obciążenia, kompensatora oraz linii. Zastosowano numerację rysunków zgodną ze stosowaną w artykule.

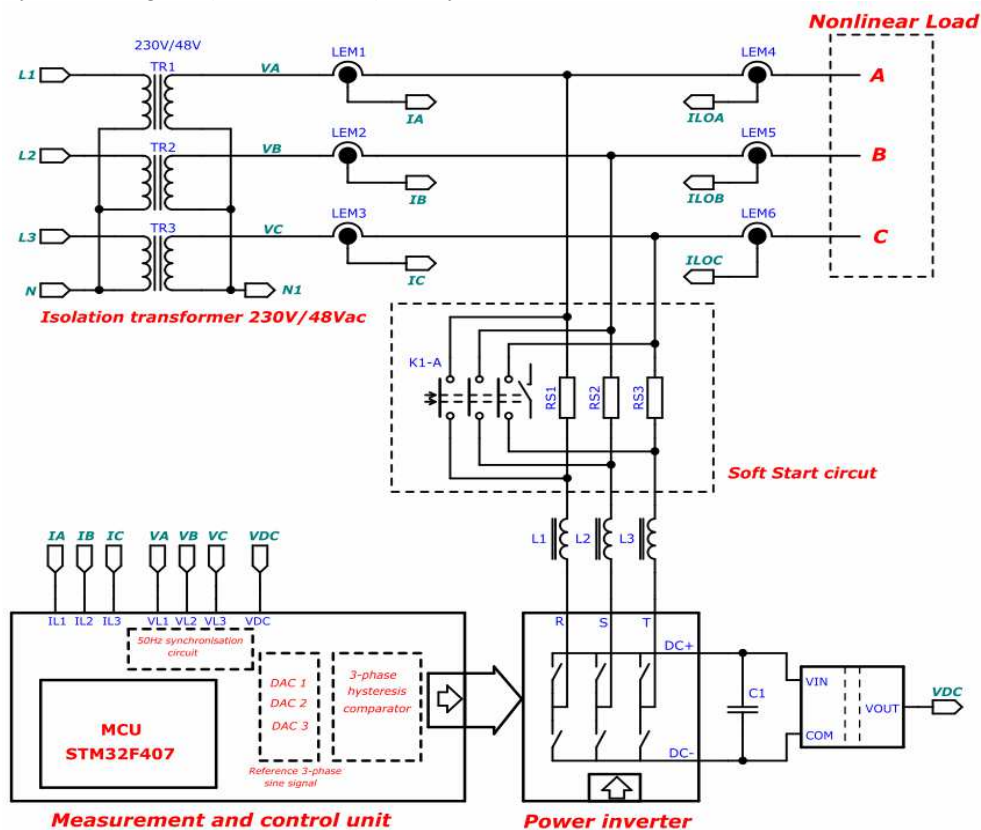


Fig. 8 Diagram of the tested circuit.

Jako elementy przełączające w przekształtniku VSI kompensatora zastosowane zostały tranzystory IRFP450. Pojemność kondensatora C_1 kompensatora została dobrana jako 0,88mF. Indukcyjności L_1 , L_2 oraz L_3 kompensatora są sobie równe i wynoszą 3mH każda.

Do sterowanie pracą kompensatora użyto mikrokontrolera STM32F407. Wykonuje on następujące zadania:

- procedura rozruchowa oraz wyłączanie kompensatora,
- sterowanie przełączaniem tranzystorów przekształtnika VSI zgodnie z histerezowym trybem kształtowania przebiegów prądów,
- obliczanie wymaganych parametrów mierzonych przebiegów,
- obliczanie przebiegu sygnału konduktancyjnego,
- generacja przebiegów wzorcowych przebiegów napięć fazowych linii i ich synchronizacja z przebiegami rzeczywistymi.

Na rysunku 4 przedstawiono kompensowane obciążenie. Jest nim jednofazowy prostownik jednopółkowy, załączony na napięcie międzyfazowe U_{BC} . Faza A jest rozwarta.

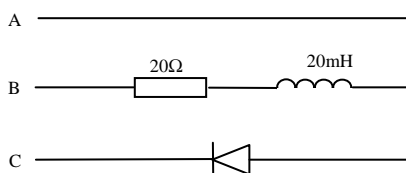


Fig. 4 Considered compensated load.

Przebiegi prądów fazowych obciążenia na tle napięcia fazy A pokazano na rysunku 9.

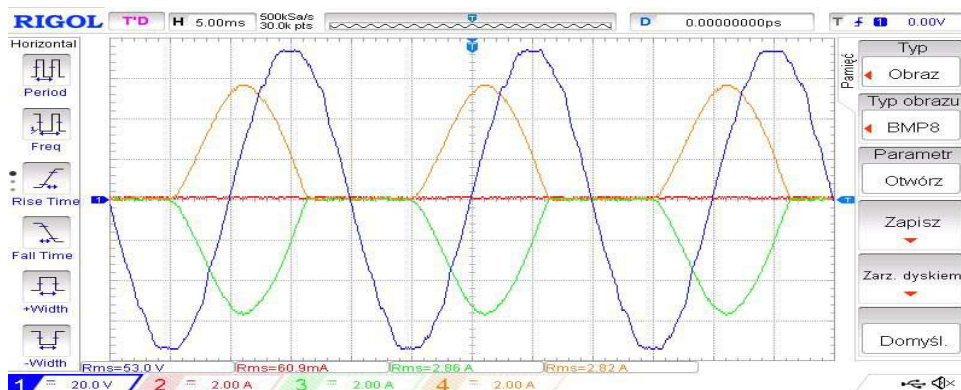


Fig. 9 Source voltage of phase A (Ch1, blue) and load phase currents of phase A (Ch2, red), of phase B (Ch3, green) and of phase C (Ch4, orange).

Na rysunku 10 pokazano przebiegi prądów fazowych kompensatora na tle napięcia fazy A. Dodatkowo kierunki prądów skierowane są do węzłów przyłączenia kompensatora, por. rys. 9. Zwraca uwagę generowanie przez kompensator wirtualnego obciążenia czynnego w fazie A linii.

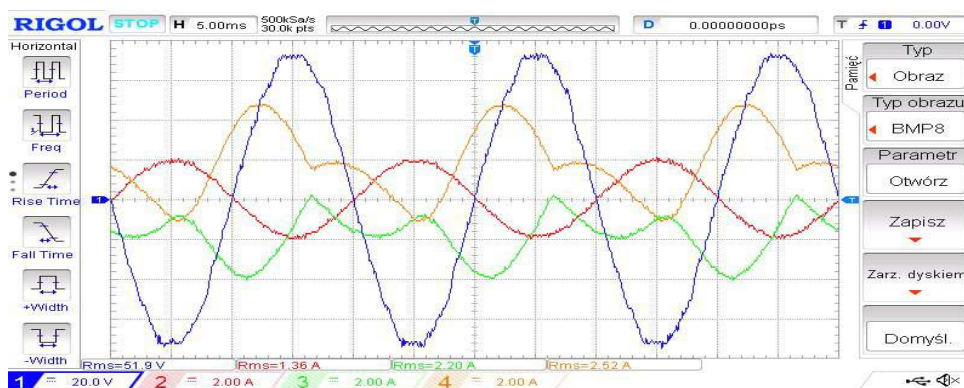


Fig. 10 Source voltage of phase A (Ch1, blue) and SAPF's phase currents of phase A (Ch2, red), of phase B (Ch3, green) and of phase C (Ch4, orange).

Na rysunku 11 pokazano przebiegi prądów fazowych linii na tle napięcia fazy A. W związku z odkształconymi przebiegami napięć fazowych linii, w układzie kompensatora generowane są przebiegi wzorcowe napięć fazowych linii. Dzięki temu prądy fazowe linii są sinusoidalne i symetryczne. W szczególności sposób naturalny, wynikający z przyjętej metody sterowania, kompensator wywołuje przepływ prądu aktywnego w fazie A linii, pomimo rozwarcia tej fazy w obciążeniu.

Z przedstawionych na rysunku 11 przebiegów, w szczególności przebiegów prądów fazowych linii wynika, że cel kompensacji został osiągnięty.

Uzyskane przebiegi prądów, zarówno prądów linii jak i kompensatora są w pełni zgodne z rozważaniami teoretycznymi oraz z weryfikacją symulacyjną.

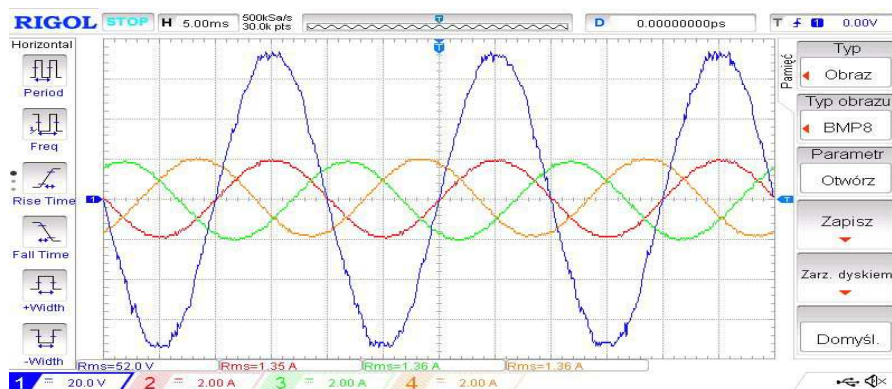


Fig. 11 Source voltage of phase A (Ch1, blue) and supply source phase currents of phase A (Ch2, red), of phase B (Ch3, green) and of phase C (Ch4, orange).

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych.

Przedstawione pod ocenę osiągnięcie naukowe jest osiągnięciem indywidualnym: jednoosobowe autorstwo monografii i cząstkowych, z jednym wyjątkiem, prac w postaci publikacji. Do pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych, niewchodzących w skład osiągnięcia wymienionego w punkcie 4b., autor wniosku zalicza osiągnięcia zespołowe, w tym pełnienie funkcji kierownika badań, pkt. 5c):

5.a) Opracowanie badawcze: Mysiński W., Szromba A., Kordowiak S.: “Noise generator with temperature stable frequency spectra. Initial circuit design”. Praca badawcza na zlecenie Mitsubishi Electric Information -Visual Information Laboratory, Guilford, Wielka Brytania. Numer umowy Politechniki Krakowskiej: E4/162/2001. Opracowanie poufne. 2001r.

Wkład autora wniosku polegał na opracowaniu części raportu związanej z techniką cyfrową oraz wygłoszeniu referatu w trakcie seminarium zdawczo/odbiorczego, przeprowadzonego dla pracowników firmy Mitsubishi. Mój udział szacuję na 40%.

5.b) Udział w charakterze konsultanta w przedsięwzięciu działającym na podstawie umowy o współpracy naukowo-technicznej, zawartej na czas nieokreślony pomiędzy Politechniką Krakowską a przedsiębiorstwem Polon-Alfa Spółka z ograniczoną odpowiedzialnością, z siedzibą w Bydgoszczy, z dnia 23.06.2017r., nr R-7/8/2017. Przedmiotem działań, zgodnie z treścią umowy, jest współdziałanie w zakresie przedsięwzięć edukacyjnych, szkoleniowych oraz ocen przydatności wdrażanych nowych rozwiązań technicznych.

5.c) Pełnienie funkcji kierownika w przedsięwzięciu działającym na podstawie umowy o współpracy naukowo-technicznej, zawartej pomiędzy Wydziałem Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechnik Krakowskiej a przedsiębiorstwem Electric Power Quality Sp. z o. o., z siedzibą w Gdańsku, z dnia 30 marca 2017, nr umowy E-0-4/2018. Współpraca dotyczy badań nad poprawą jakości energii elektrycznej, ze szczególnym uwzględnieniem energoelektronicznych filtrów aktywnych.

5.d) Rola wykonawcy w przedsięwzięciu działającym na podstawie umowy o współpracy naukowo-technicznej, zawartej pomiędzy Wydziałem Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechnik Krakowskiej a firmą Elektrotel Sp. z o. o., z siedzibą w Gliwicach, z dnia 30 marca 2018, nr E-0-5,1028. Współpraca dotyczy badań nad efektywnością wykorzystania energii elektrycznej w podmiotach zewnętrznych.

6. Podsumowanie

6.a) Dorobek publikacyjny autora wniosku po uzyskaniu stopnia doktora wynosi 25 artykułów, w tym 24 samodzielne.

W bazie Web of Science Core Collection indeksowanych jest 6 publikacji, które cytowane są 17 razy (19 na dzień 2018-11-06), w tym 9 bez autocytowań. Indeks Hirscha w tej bazie wynosi 2 (3 na dzień 2018-11-06). Łącznie artykuły z listy A zostały pobrane ze strony wydawcy 855 razy (od 2013 roku).

W bazie Scopus indeksowanych jest 8 publikacji, które cytowane są 29 razy (31 na dzień 2018-11-06), w tym 11 z wyłączeniem autocytowań. Indeks Hirscha w tej bazie wynosi 3.

W bazie Google Scholar indeksowanych jest 36 publikacji, które cytowane są 58 razy (62 na dzień 2018-11-06). Indeks Hirscha w tej bazie wynosi 4.

Sumaryczny impact factor czasopism zawierających cytowania artykułów wnioskodawcy, według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania, wynosi 13,161.

6.b) Trzy publikacje autora wniosku zostały zacytowane w rozprawie doktorskiej:

Robert V. Watson: „Mains Power Quality Improvement using Active Filters”,
University of Glamorgan, June 2009. Cytowane w tej rozprawie publikacje to:

1. Szromba A.: “A Shunt Active Power Filter: Development of Properties”, COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering Vol 23 no 4, 2004 pp 1146-1162.
2. Szromba A.: “Sampled Method of Active Power Filter Control (Part 1)”, Electrical Power Quality and Utilization, Journal, Vol XI, No 2, 2005.
3. Szromba A.: Synchronized Active Power Filter, 2005 IEEE 0-7803-9343-0/05

6.c) Aktywność autora wniosku w środowisku naukowym przejawia się aktywnym uczestnictwem w międzynarodowych konferencjach naukowych, w tym również pełnieniem funkcji *session chair*, *sesja DS3d: Topic 2: Power Factor Correction Techniques* podczas konferencji *IEEE 17th European Conference on Power Electronics and Application EPE 2017*.

6.d) Autor wniosku jest również zapraszany do recenzowania artykułów, w tym czasopism indeksowanych w bazie JCR: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* – 12 recenzji, *IEEE Transactions on Power Delivery* – 1 recenzja, *ISA Transactions Elsevier* – 1 recenzja, jak również innych renomowanych czasopism spoza tej bazy: *Archives of Electrical Engineering* – 1 recenzja, *The Open Electrical & Electronic Engineering Journal* – 1 recenzja.

Autor wniosku recenzował również artykuły do konferencji *IEEE International Symposium on Electrical Machines* - 2 recenzje.

6.e) Autor wniosku jest promotorem pomocniczym w dwóch przewodach doktorskich:

- 1) Przewodzie mgr inż. Konrada Hawrona na temat: „Zastosowanie pojęcia czasowo-zależnej mocy czynnej do zagadnień optymalizacyjnej teorii mocy”, otwarcie przewodu doktorskiego: grudzień 2016, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej PK.
- 2) Przewodzie mgr inż. Dominika Mamcarza na temat: „Filtracja prądów i napięć w sieci elektroenergetycznej za pomocą automatycznie dostrajanych filtrów pasywnych i aktywnych”, otwarcie przewodu doktorskiego: maj 2018, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej PK.

6.f) Poza działalnością naukową autor wniosku prowadzi działalność dydaktyczną, organizatorską oraz popularyzatorską. Poza standardową aktywnością nauczyciela akademickiego jest opiekunem Koła Naukowego Elektryków od 2009r, był opiekunem 62 prac dyplomowych inżynierskich i magisterskich, prowadzi własny moduł (wykład wraz z laboratorium komputerowym) w programie Erasmus. Działalność dydaktyczna jest pozytywnie oceniana przez studentów, między innymi przez kilkukrotne przyznanie tytułu najlepszego dydaktyka Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej PK.

Na działalność organizatorską składa się pełnienie funkcji prodziekana od 2012r; kolejno członka, sekretarza oraz przewodniczącego Wydziałowej Komisji Rekrutacyjnej od 1999r do chwili obecnej; osoby odpowiedzialnej za organizację przedsięwzięć popularyzatorskich i promocyjnych typu Dni Otwarte Uczelni, Dni Otwarte Wydziału, krakowski Festiwal Nauki; prezentacje oferty edukacyjnej Wydziału dla kandydatów obcokrajowców na studia; prelekcje dla uczniów szkół ponadpodstawowych. Ponadto udział w wielu innych działaniach pojawiających się w miarę bieżących potrzeb, na przykład udział w organizacji Konferencji Naukowej oraz Forum Biznesowego w związku z uroczystościami Jubileuszu 70-lecia Politechniki Krakowskiej, za który autor wniosku otrzymał w roku 2015 nagrodę zespołową Rektora PK.