

STEROWANIE PRZEKSZTAŁNIKIEM AC/DC W PME

Jarosław Michalak¹, Marcin Zygmanski²

Wprowadzenie

W opracowaniu³ przedstawiono wybrane zagadnienia dotyczące właściwości regulacyjnych przekształtnika AC/DC współpracującego z siecią prądu przemiennego. Przekształtnik ten w prosumenckiej mikroinfrastrukturze energetycznej - PME pełni rolę interfejsu podłączającego OZE oraz zasobnik do sieci i odbiorników [[Popczyk, Zygmanski, Michalak, Kielan, Fice](#)]. W opracowaniu ujęto następujące zagadnienia – właściwości dynamiczne dla trybu on-grid (współpracy z siecią zasilającą) i trybu pracy wyspowej (off-grid), regulacja mocy w przekształtniku AC/DC, działanie przekształtnika przy różnych scenariuszach sterowania dla trybu współpracy z siecią i pracy wyspowej. W rozważaniach przyjęto, że o strategii działania i aktualnej funkcji realizowanej przez przekształtnik AC/DC decydują aktualne warunki zasilania występujące w sieci do której przyłączona jest mikroinfrastruktura PME oraz ewentualnie dynamicznie zmieniająca się cena energii. Niniejsze opracowanie pokazuje więc możliwości zastosowania przekształtnika AC/DC i całej mikroinfrastruktury PME do regulacji mocy (na żądanie OHT), a poprzez to bilansowania mocy wirtualnej wyspy [[Popczyk](#)] w węzłach bilansujących, na styku między wirtualną wyspą a systemem elektroenergetycznym.

1. Przekształtnik AC/DC – informacje podstawowe

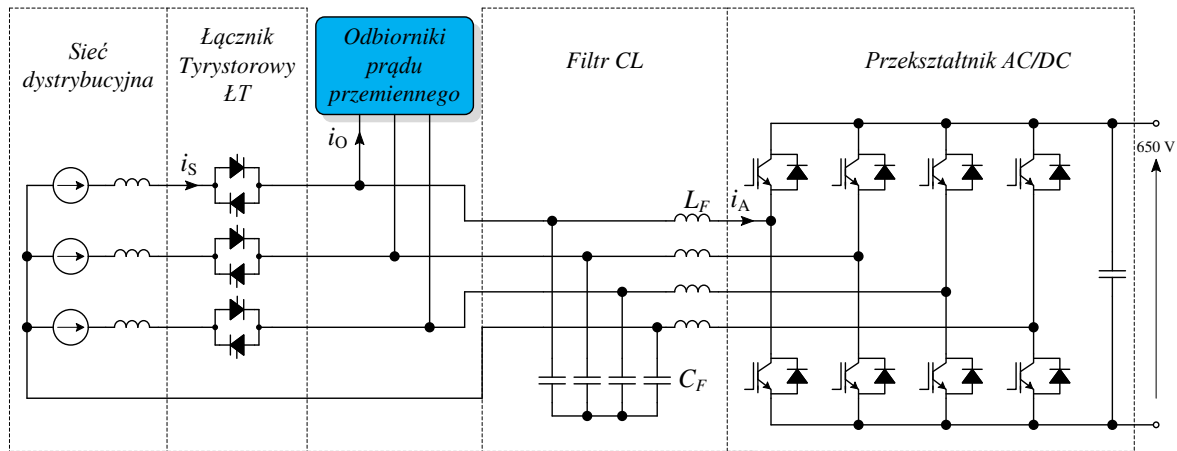
Typową topologię, przeznaczonego dla mikroinfrastruktury PME, trójfazowego przekształtnika AC/DC wraz z układem przyłączającym do sieci dystrybucyjnej przedstawia rysunek 1 [[Popczyk, Zygmanski, Michalak, Kielan, Fice](#)]. Rozważany jest układ czteroprzewodowy, pozwalający na niezależne kształtowanie prądów w każdej z faz (i przewodzie zerowym). Przedstawiony przekształtnik AC/DC jest dwupoziomowy, przy czym istnieje możliwość zastosowania również rozwiązania trójpoziomowego pozwalającego polepszyć kształt prądów wejściowych. Niemniej w celu uproszczenia analizuje się rozwiązanie dwupoziomowe, co jednak nie powoduje utraty ogólności analizy. Prezentowana topologia należy do równoległych, co oznacza, że dla trybu współpracy z siecią (on-grid) przekształtnik podłączony jest równolegle do odbiorników i ma za zadanie bilansować energię w punkcie przyłączenia [[Michalak](#)] oraz zapewniać odpowiednie kształtowanie profilu mocy w punkcie przyłączenia. W przypadku pracy wyspowej (off-grid) przekształtnik zasila bezpośrednio odbiorniki bez udziału sieci zasilającej. Zastosowany filtr LC jest wykorzystany ze względu na potrzebę współpracy z siecią (pęta regulacji prądu) i pracy wyspowej (wewnętrzna pętla regulacji prądu i nadrzędna pętla regulacji napięcia). Zapewnia to z jednej strony kształtowanie odpowiedniego prądu na wyjściu przekształtnika AC/DC,

¹ dr inż. Jarosław Michalak – Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, Wydział Elektryczny, Politechnika Śląska.

² dr inż. Marcin Zygmanski – Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, Wydział Elektryczny, Politechnika Śląska.

³ Opracowanie zostało wykonane w ramach Projektu badawczego „Rewitalizacja prosumenckich mikroinstalacji energoelektrycznych (REWIPROMIEN)”, realizowanego w ramach Programu GEKON – Generator Koncepcji Ekologicznych, który jest wspólną inicjatywą Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej (NFOŚiGW) oraz Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NCBR). Wykonawcą Projektu jest Konsorcjum, w skład którego wchodzi: Euro Centrum – lider, Politechnika Śląska, Uniwersytet Zielonogórski i Akademia Górniczo Hutnicza.

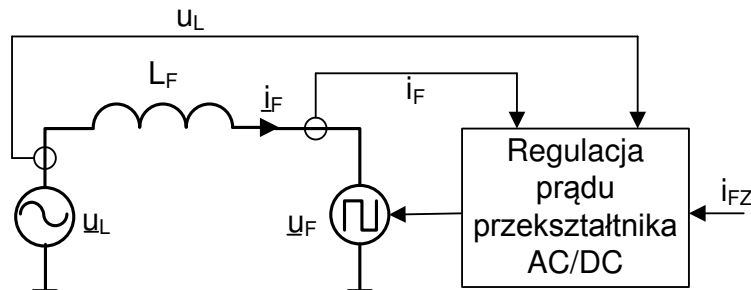
a z drugiej strony zapewnia odpowiedni kształt napięcia zasilającego odbiorniki w trybie off-grid. Łącznik tyrystorowy w punkcie przyłączenia służy do odłączenia sieci od odbiorników w przypadku pracy w trybie wyspowym.



Rys. 1. Topologia rozważanego przekształtnika AC/DC

2. Właściwości dynamiczne przekształtnika AC/DC w trybie on-grid

Na rys. 2 przedstawiony został schemat zastępczy układu sieć-przekształtnik. Układ ten uwzględnia sieć zasilającą, przekształtnik i dławik wejściowy. Prąd sieci dla niniejszego schematu opisany jest zależnością (1). W celu poprawnego kształtowania prądu wejściowego przekształtnik AC/DC powinien generować napięcie kompensujące napięcie sieci \underline{u}_L oraz dodatkowo napięcie powodujące przepływ odpowiedniej wartości prądu dławika \underline{i}_F .



Rys. 2. Profile mocy ze źródeł OZE w analizowanym przypadku

$$\underline{i}_F = \frac{1}{R_{L_F} + sL_F} (\underline{u}_L - \underline{u}_F) \quad (1)$$

Przy pominięciu rezystancji dławików filtrujących, napięcie zadane falownika może więc być określane w oparciu o równanie (2):

$$\underline{u}_{FZ} = \underline{u}_L - k_P \frac{L_F}{T_i} (\underline{i}_{FZ} - \underline{i}_F) \quad (2)$$

gdzie:

k_P – współczynnik wzmocnienia w pętli regulacji prądu,

T_i – okres wykonywania obliczeń w sterowniku.

Równanie (2) obowiązuje dla przykładowego algorytmu sterowania, bazującego na regulatorze typu P i właściwościach całkujących układu sieć, dławik, przekształtnik (przy pominięciu rezystancji dławika) [Casadei]. O dynamice działania pętli regulacji prądu decyduje współczynnik k_P i ze względu na jego stosunkową prostotę i przejrzystość

zdecydowano się na opis takiego algorytmu sterowania przy analizie właściwości dynamicznych przekształtnika AC/DC w mikroinfrastrukturze PME. W przypadku innych rozwiązań (np. algorytmy z regulatorami PI [Malinowski] oraz algorytmy predykcyjne [Wojciechowski]) uzyskuje się zbliżone lub lepsze właściwości dynamiczne. Równanie (2) opisuje działanie przekształtnika z układem regulacji w stacjonarnym (nieruchomym) układzie współrzędnych α, β i nie wymaga żadnego układu odprężania między składowymi. Pomijając opóźnienia w torze sterowania przekształtnika, transmitancję zastępczej pętli regulacji prądu uzyskuje się wstawiając zależność (2) do (1), przyjmując, że $\underline{u}_F = \underline{u}_{FZ}$. Równanie (3) pokazuje jak współczynnik k_p wpływa na dynamikę pętli regulacji prądu.

$$\dot{i}_F = \frac{\frac{1}{\frac{T_i \cdot R_{LF}}{k_p \cdot L_F} + 1}}{\frac{T_i}{k_p \cdot (T_i \cdot R_{LF} + 1)} s + 1} \dot{i}_{FZ} \approx \frac{1}{\left(\frac{T_i}{k_p} s + 1\right)} \dot{i}_{FZ} \quad (3)$$

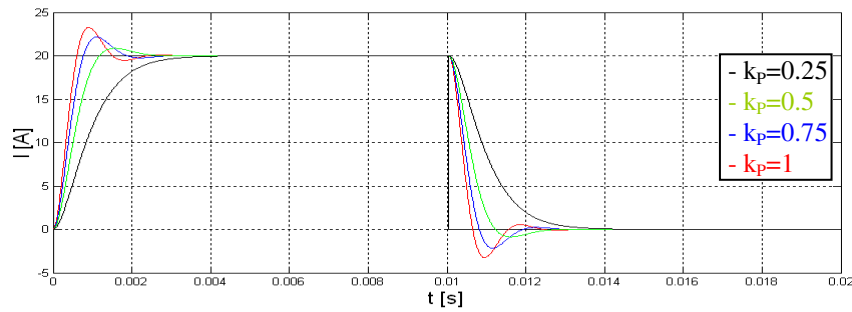
W przypadku założenia braku opóźnień w torze regulacji i w przekształtniku można osiągnąć praktycznie dowolną dynamikę pętli regulacji prądu. W rzeczywistym układzie należy uwzględnić dynamikę przekształtnika i modulatora, związane z częstotliwością przełączeń tranzystorów. Przyjmuje się, że dla takiego układu opóźnienia te wynoszą $\tau = 3/2 T_i$, gdzie T_i jest odwrotnością częstotliwości przełączeń tranzystorów. Przy przyjęciu założonych opóźnień w układzie transmitancja zamkniętej pętli regulacji przyjmuje postać:

$$\dot{i}_F = \frac{k_p \frac{L_F}{R_{LF}} \frac{1}{\tau} e^{-s\tau}}{\frac{L_F}{R_{LF}} s + 1 + k_p \frac{L_F}{R_{LF}} \frac{1}{\tau} e^{-s\tau}} \dot{i}_{FZ} + \frac{\frac{1}{R_{LF}} (1 - e^{-s\tau})}{\frac{L_F}{R_{LF}} s + 1 + k_p \frac{L_F}{R_{LF}} \frac{1}{\tau} e^{-s\tau}} u_L \quad (4)$$

Wprowadzając aproksymację bloku opóźnienia elementem inercyjnym I rzędu oraz pomijając rezystancję dławika w filtrze otrzymuje się transmitancję:

$$\dot{i}_F = \frac{1}{\frac{\tau^2}{k_p} s^2 + \frac{\tau}{k_p} s + 1} \dot{i}_{FZ} + \frac{\frac{\tau^2}{k_p L_F} s}{\frac{\tau^2}{k_p} s^2 + \frac{\tau}{k_p} s + 1} u_L \quad (5)$$

Transmitancja ta zawiera dwa człony, z których pierwszy (pożądany) określa reakcję układu na prąd zadany, natomiast drugi (niepożądany) opisuje wpływ napięcia sieci (traktowanego jako zakłócenie) na prąd przekształtnika AC/DC. Mianowniki transmitancji są II rzędu, a o pierwiastkach równania charakterystycznego decyduje współczynnik k_p . Na rysunku 3 przedstawiono odpowiedzi prądu przekształtnika na skokową zmianę prądu zadanego, przy różnych wartości współczynnika k_p . Współczynnikowi $k_p = 0.25$ odpowiada najszybsza odpowiedź aperiodyczna, a $k_p = 0.5$ odpowiada kryterium modułowemu doboru regulatorów [Tunia] (charakteryzującego się 4% przeregulowaniem). Dla wyższych wartości współczynnika odpowiedź na skok wielkości zadanej ma charakter oscylacyjny.

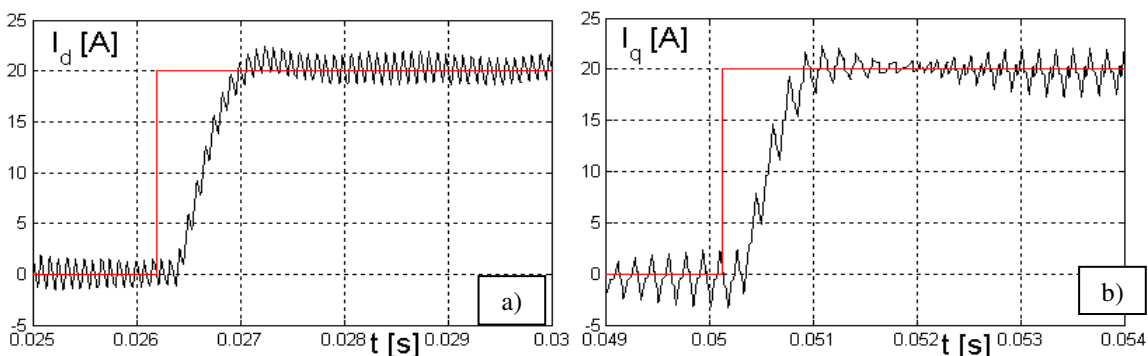


Rys. 3. Odpowiedź zamkniętej pętli regulacji prądu na skokową zmianę prądu zadanego

Transmitancja zakłócenia od napięcia sieci powoduje efekt generacji niepożądanego prądu o charakterze pojemnościowym, który dla pierwszej harmonicznej można eliminować, wprowadzając poprawkę na prąd zadany przekształtnika. Występowanie wyższych harmonicznych w napięciu sieci prowadzi do generacji wyższych harmonicznych prądu, których amplitudy (w przypadku występowania harmonicznych w napięciu sieci) wynikają z charakterystyk amplitudowo-fazowych.

Odpowiedź układu sterowania przekształtnika AC/DC na skokową zmianę składowych zadanych prądu (odpowiedzialnych za moc czynną i bierną), dla modelu uwzględniającego mikroprocesorową realizację, pokazano na rysunku 4 ($k_p = 0.5$). Przy wykorzystaniu prezentowanej metody sterowania prądem przekształtnika AC/DC, wewnętrzną pętlę regulacji prądu, opisaną transmitancją II rzędu (5), aproksymuje się transmitancją I rzędu – równanie (6), co upraszcza dalszą syntezę układu sterowania. Dla wartości współczynnika $k_p \leq 0,5$ błąd aproksymacji jest niewielki. Dynamika w rozważanym przypadku nie jest najwyższa, niemniej wystarczająca przy założonym zadaniu regulacji mocy. W literaturze można znaleźć algorytmy sterowania pozwalające na kompensację opóźnień i uzyskanie lepszej dynamiki kształtowania prądu [Wojciechowski].

$$\dot{i}_F = \frac{1}{2\tau s + 1} \dot{i}_{FZ} \quad (6)$$

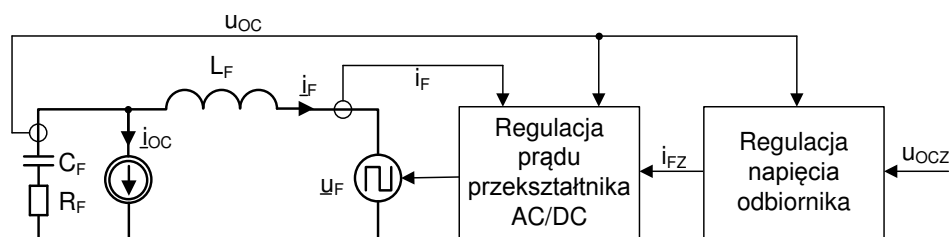


Rys. 4. Reakcja wewnętrznej pętli regulacji na skokową zmianę prądu zadanego w osi d(a) i q(b)

Pokazane na rysunku 4 przebiegi składowych d, q prądu przedstawione są w układzie wirującym względem wektora przestrzennego napięcia sieci. W układzie nieruchomym odpowiada to sinusoidalnemu prądowi współfazowemu napięciu sieci (składowa d), lub prądowi sinusoidalnemu przesuniętemu o 90 stopni (składowa q). Stała czasowa pętli kształtowania prądu (2τ) wynosi $600 \mu s$ dla typowej dla przekształtników o mocy kilku kW częstotliwości przełączeń równej 5 kHz . Oznacza to możliwość uzyskania prądu zadanego (a tym samym mocy zadanej na zaciskach wyjściowych przekształtnika AC/DC) w czasie pojedynczych ms.

3. Właściwości dynamiczne przekształtnika AC/DC w trybie off-grid

Analizowana w rozdziale 2 dynamika kształtowania prądu w przekształtniku AC/DC stanowi pętlę podrzędną regulacji prądu zarówno w pracy typu on-grid (w której odbywa się regulacja mocy), jak i off-grid (gdzie zasadniczo reguluje się napięcie na zaciskach odbiornika). Pracę w trybie off-grid rozpoczyna się gdy po wystąpieniu zakłóceń w napięciu sieci układ sterowania odłącza infrastrukturę PME i odbiorniki od sieci (mikroinfrastruktura PME stanie się wyspą). W trybie tym przekształtnik AC/DC generuje napięcia odbiorników u_{OC} , w oparciu o wewnętrzny algorytm przyrostowy kąta położenia zadanego wektora przestrzennego napięcia, wirującego ze stałą częstotliwością 50 Hz. Przekształtnik pracuje z wewnętrzną pętlą regulacji prądu (opisaną wcześniej), jednak poprzez zastosowanie wyjściowego filtra pojemnościowego C_F , układ pracuje jako sterowane źródło napięcia. Schemat zastępczy dla przekształtnika AC/DC wraz z odbiornikami przedstawia rysunek 5. Wewnętrzna pętla regulacji zapewnia zadaną wartość prądu, natomiast zadaniem zewnętrznej pętli regulacji jest utrzymanie zadanej wartości napięcia na kondensatorze filtra C_F . Takie podejście pozwala na potraktowanie prądu obciążenia jako zakłócenie i uniezależnia syntezę regulatora od charakteru obciążenia (liniowego lub nieliniowego). Należy tu zaznaczyć, że całość regulacji odbywa się w układzie wirującym d, q , zorientowanym względem położenia zadanego napięcia odbiorników, w którym wielkości sinusoidalnie zmienne stają się wielkościami stałymi.



Rys. 5. Schemat ideowy układu przekształtnika AC/DC – obciążenie dla pracy wyspowej

Zadaniem przekształtnika AC/DC w trybie off-grid jest generacja napięć na kondensatorach filtra C_F , a tym samym odbiornikach. Prądy zadane dla wewnętrznej pętli regulacji prądu są wyznaczone w regulatorach PI kontrolujących składowe d , q napięcia odbiornika. Do układu wirującego transformowane są mierzone napięcia na zaciskach odbiornika. Przekształtnik AC/DC reguluje wartości napięć na kondensatorze filtra, natomiast prądy obciążenia traktuje się jako zakłócenia. Korzystając z tego podejścia oraz uwzględniając rezystor R_F filtra, zastosowany do poprawy tłumienia oscylacji, uzyskuje się następujące zależności na składowe napięcia kondensatora:

$$\frac{du_{CFd}}{dt} = -\frac{1}{C_F} (i_{Fd} + i_{OCd}) + \omega \cdot u_{CFq} \quad (7)$$

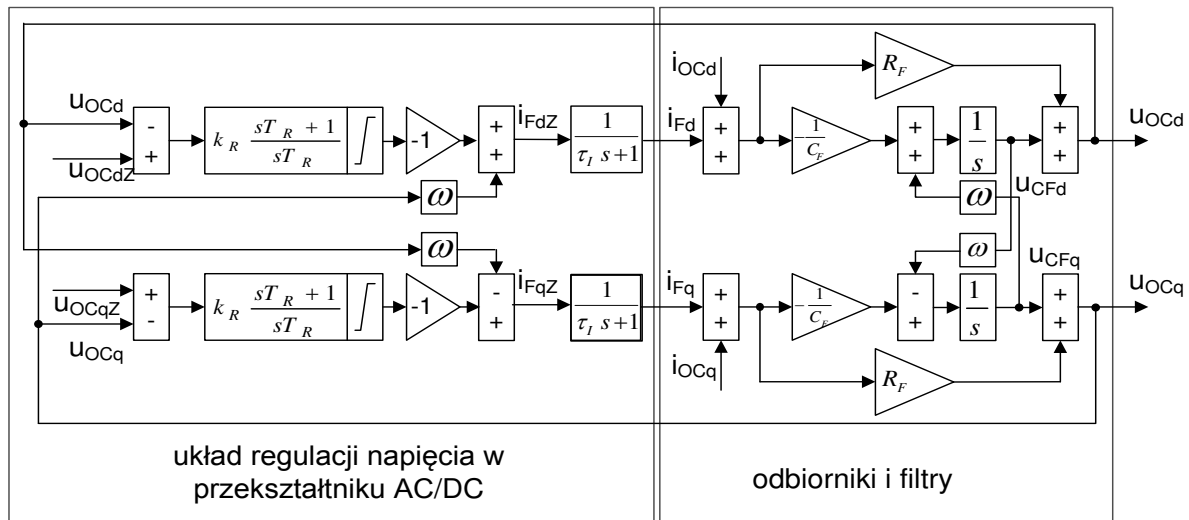
$$\frac{du_{CFq}}{dt} = -\frac{1}{C_F} (i_{Fq} + i_{OCq}) - \omega \cdot u_{CFd}$$

$$\begin{aligned} u_{OCd} &= u_{CFd} + R_F \cdot (i_{Fd} + i_{OCd}) \\ u_{OCq} &= u_{CFq} + R_F \cdot (i_{Fq} + i_{OCq}) \end{aligned} \quad (8)$$

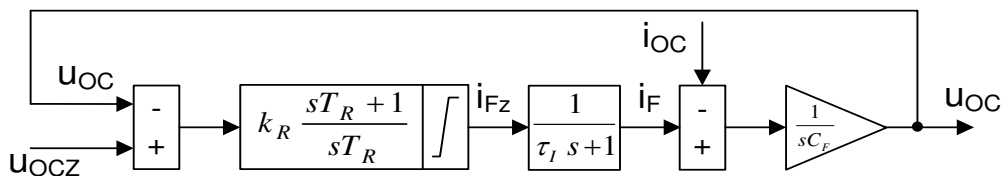
W układzie d, q występują sprzężenia pomiędzy składowymi napięciami kondensatora. Zastosowanie sygnałów służących do odsprężania w pętlach regulacji poprawia jakość regulacji składowych. Założono tu uproszczone odsprężanie, wykorzystujące zamiast napięć kondensatorów filtra u_{CF} , napięcia na zaciskach odbiornika (pomija się wpływ rezystancji

filtru R_F). Przy zmianie prądu obciążenia, wpływ rezystancji jest trudny do wyeliminowania, jednak występujący w tym przypadku błąd (większy niż dla samego kondensatora w gałęzi poprzecznej) przyspiesza reakcję regulatora napięcia.

Strukturę układu, regulacji przy uwzględnieniu sygnałów odsprzęgających i rezystorów występujących w filtrze, przedstawiono na rys. 8. Pomijając rezystancję R_F zamknięty układ regulacji można uprościć do, obowiązującej dla obu składowych d, q , struktury z rys. 7, składającej się z regulatora, elementu inercyjnego I rzędu (wewnętrzna pętla regulacji prądu) oraz układu całkującego. Zakłóceniem jest tu prąd obciążenia.



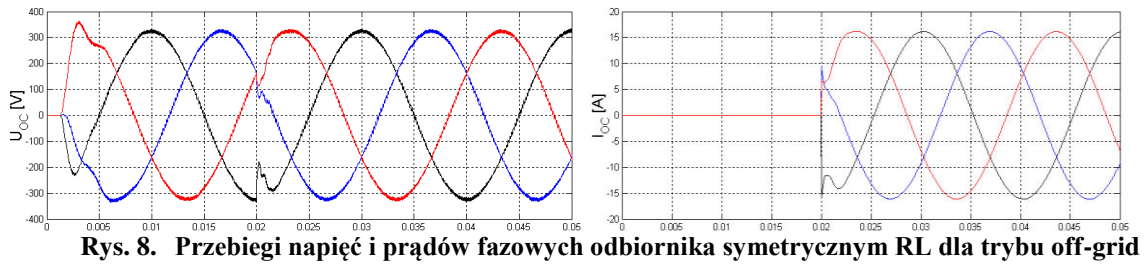
Rys. 6. Układ regulacji napięcia odbiornika, wraz z odbiornikiem i filtrami



Rys. 7. Uproszczona struktura układu sterowania napięcia odbiornika

Dla takiego obiektu regulacji w postaci układu całkującego, przy wymaganiu szybkiej reakcji na zakłócenie, można zastosować kryterium symetryczne [Tunia] oraz dodatkowo należy zastosować filtr wejściowy tłumiący przeregulowanie związane ze skokową zmianą napięcia zadanego. Przy doborze regulatora według kryterium symetrycznego zakłada się jednak, że stała całkowania jest większa od stałej czasowej w elemencie inercyjnym I rzędu. Warunek ten, przy niewielkich wartościach pojemności, nie jest spełniony w przypadku przekształtnika AC/DC pracującego w trybie off-grid. Wtedy przy skokowej zmianie wielkości zadanej i skokowej zmianie obciążenia, przy mniejszych wartościach pojemności, uwzględnieniu realizacji praktycznej oraz rezystancji filtra uzyskuje się przebiegi charakteryzujące się oscylacjami. Wynika to z: uproszczenia układu wewnętrznej pętli regulacji prądu do inercji I rzędu oraz występowanie sprzężeń pomiędzy regulacją w obu osiach. Błędy spowodowane działaniem wewnętrznej pętli regulacji prądu uwydatniają się dla krótkich czasów regulacji. Z tego względu nastawy regulatorów bazujące na kryterium symetrycznym należy traktować jako wartości początkowe do dalszego dostrojenia. Efekt dostrojenia można zauważyć na rysunku 8. Przedstawiono tu reakcję układu sterowania na skokową zmianę napięcia zadanego i załączenie obciążenia liniowego symetrycznego. Uzyskuje się tu

niewielkie oscylacje w przypadku skokowej zmiany wielkości zadanej i przeregulowanie przy skokowej zmianie obciążenia. Dla tak dobranych regulatorów czas reakcji wynosi około 2 ms.



Rys. 8. Przebiegi napięć i prądów fazowych odbiornika symetrycznym RL dla trybu off-grid

Działanie opisanego wcześniej układu regulacji przy odbiorniku niesymetrycznym przedstawia rysunek 9a. Asymetria obciążenia powoduje występowanie różnic w amplitudach napięć fazowych odbiorników, przesunięć pomiędzy napięciami fazowymi i ich odkształceń. Wynika to z ograniczonej dynamiki regulatorów napięcia i wewnętrznej pętli regulacji prądu.

W celu lepszej stabilizacji składowej d napięcia odbiorników można wykorzystać sprzężenia od prądu odbiorników, przy ich dostępności pomiarowej. W układzie sterowania, pokazanym na rysunku 6, do sygnałów zadanych prądów (i_{FZd} , i_{FZq}) dla wewnętrznej pętli regulacji prądu należy dodać prądy odbiorników (i_{OCd} , i_{OCq}). Dodatkowa pętla sprzężenia zwrotnego powoduje, że prąd obciążenia jest generowany bezpośrednio przez wewnętrzną pętlę regulacji, a sygnał wyjściowy z regulatorów napięcia kompensuje zmiany składowych napięcia odbiorników, co pozwala na szybszą reakcję przekształtnika AC/DC.

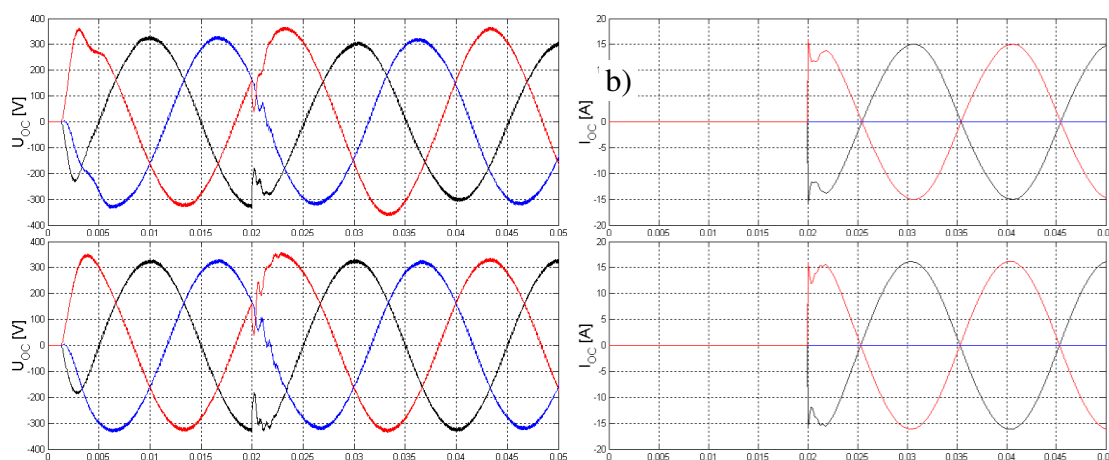
Skuteczność zastosowania sprzężenia od prądu odbiorników potwierdza praca układu przy odbiorniku niesymetrycznym, przedstawiona na rysunku 9b. W porównaniu do przebiegów na rysunku 9a asymetrie w napięciu zostały zredukowane do około 2%. Ostatecznie do doboru układu regulacji z dodatkowym sprzężeniem prądowym regulatory napięć można dobrać z zależności:

$$k_R = \frac{C}{2\tau_I} \quad (9)$$

$$T_R = 12\tau_I$$

a)

W tym przypadku otrzymuje się przeregulowanie rzędu 10 % przy zmianie wielkości zadanej i zakłócającej. Uzyskana dynamika kształtowania odpowiedzi wyjściowej ma wartości pośrednie między doborem z kryterium symetrycznego i modułowego.



Rys. 9. Przebiegi napięć i prądów fazowych odbiornika dla obciążenia niesymetrycznym RL, dla regulatorów napięcia dobranych z kryterium symetrycznego (a) oraz regulatorów dobranych według zależności (9) po zastosowaniu dodatkowego sprzężenia prądowego

Podsumowując uzyskane wyniki można powiedzieć, że zarówno dynamika pętli regulacji prądu (mająca największe znaczenie w trybie pracy on-grid), jak i dynamika nadrzędnej pętli regulacji napięcia (stosowanej w trybie pracy off-grid) jest wysoka. Uwzględniając częstotliwości przełączeń na poziomie kilku kiloherców odpowiedź zadana napięcia i prądu (mocy) uzyskuje się w czasie pojedynczych milisekund.

4. Regulacja mocy w trybie on-grid

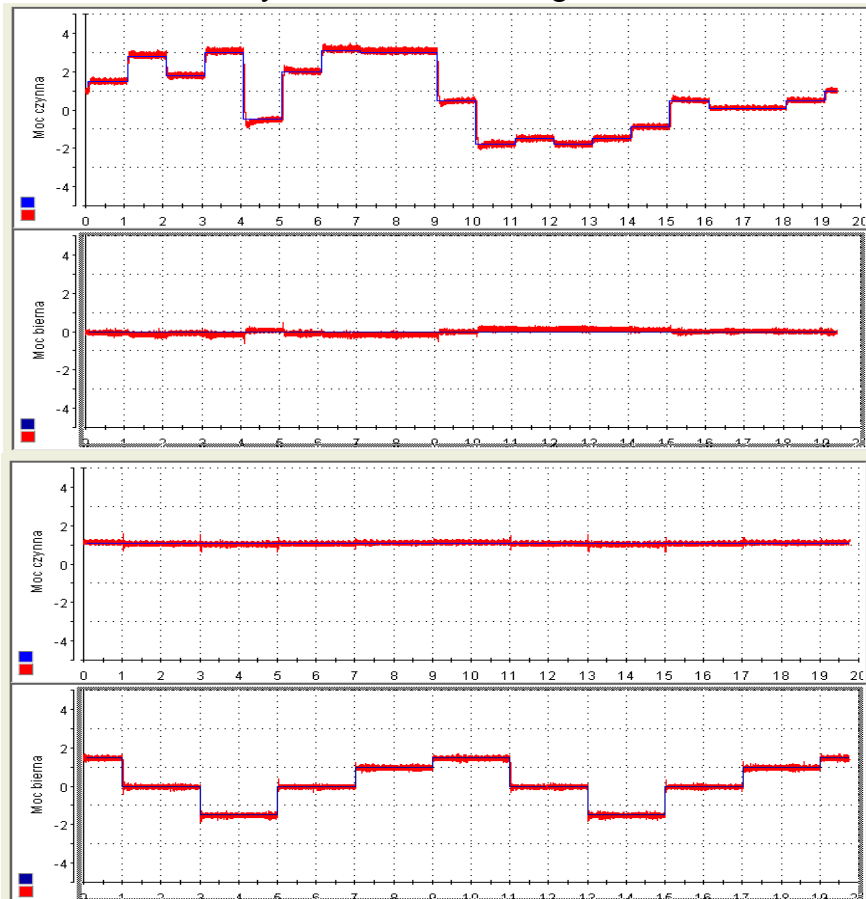
Możliwość kształtowania prądów w punkcie przyłączenia z dynamiką na poziomie pojedynczych milisekund pozwala na szybką regulację mocy na styku: sieć, interfejs PME oraz odbiorniki. Jak to zostało przedstawione w opracowaniu [Michalak] regulacja mocy dotyczy możliwości śledzenia profilu zadanego w punkcie przyłączenia (np. minimalizacji poboru energii w taryfie dziennej dla taryfy dwustrefowej). Śledzenie to dotyczy zarówno zmian profilu zadanego jak i zmian obciążeń związanych z bilansowaniem energii w punkcie przyłączenia do sieci.

Przy opisie możliwości regulacji mocy zakłada się, że interfejs w prosumenckiej mikroinfrastrukturze energetycznej wyposażony jest w zasobnik, którego działanie rozważa się jedynie z punktu widzenia ograniczeń co do wartości maksymalnej i minimalnej naładowania. Jako sygnał sterujący przyjęto taryfę dynamiczną (generowaną przez OHT Wirtualnej Wyspy) określaną ceną energii, która jest zależna od aktualnego zapotrzebowania u odbiorców przyłączonych do WW. Należy tu zaznaczyć, jak to opisano w [Michalak] istnieje możliwość kształtowania profili mocy w punkcie przyłączenia, a następnie takiego sterowania odbiornikami aby zapewnić jak najlepsze bilansowanie energii. Dopasowanie do profilu zadanego (z uwzględnieniem mocy odbiorników) zapewniają przekształtniki w infrastrukturze PME, przy czym kształtowanie profili (regulacja mocy) i bilansowanie energii są wielkościami zależnymi. Należy pamiętać, że śledzenie profilu zadanego mocy w konsekwencji prowadzi do zmian energii w zasobniku.

W celu odpowiedniego kształtowania profili mocy sterownik nadrzędny sterownik powinien uwzględniać: aktualną cenę energii (w oparciu o taryfę dynamiczną), prognozę pogody oraz poziom naładowania akumulatora. O ilości pobieranej/generowanej mocy czynnej decyduje algorytm w sterowniku nadrzędnym, który może być parametryzowany przez prosumenta. W przypadku zapotrzebowania na moc bierną w WW interfejs PME może realizować to zadanie w zakresie ograniczonym wynikającym z mocy znamionowej pozornej przekształtnika AC/DC w interfejsie PME oraz aktualnej wartości mocy czynnej. Dodatkowo o opłacalności generacji/poboru mocy biernej mogą decydować straty w przekształtniku AC/DC, związane z jej generacją. Należy również zauważyć, że generacja mocy biernej nie może zakłócać algorytmu bilansowania energii. Możliwości realizacji praktycznej śledzenia mocy czynnej i biernej pokazano na rysunku 10. Pomiarów dokonano na stanowisku z przekształtnikiem o mocy 7 kVA, działającym z częstotliwością przełączeń tranzystorów równą 5 kHz. Na rysunku pokazano niezależne kształtowanie profili mocy czynnej i biernej. Wielkości zadane zaznaczone są kolorem niebieskim, a rzeczywiste moce – kolorem czerwonym. Badania dotyczyły możliwości kształtowania mocy zmieniających się co sekundę. Uzyskane wyniki pokazują wysoką dynamikę realizowania skokowych zmian mocy czynnej i mocy biernej oraz praktycznie niezależną możliwość wpływania na moc czynną i moc bierną.

Przykładowy algorytm kształtowania profili mocy zadanych (decydujący o generacji/poborze mocy czynnej w punkcie przyłączenia) mógłby bazować na poziomach energii i ceny, ustawianych przez prosumenta. Poziomy te dotyczyłyby cen energii oraz energii zgromadzonej w zasobniku, przy czym w celu uproszczenia opisu algorytmu pominięto niezbędne w układzie rzeczywistym histerezy. W dalszej analizie założono następujące poziomy cen energii: C_{OPLS} , C_{OPLZ} – próg opłacalności odpowiednio sprzedaży

i zakupu energii oraz poziomy naładowania zasobnika: E_R i E_L – odpowiednio poziom pozwalający na rozładowanie i poziom wymagający ładowania. W tabeli 1 przedstawiono przykładowe działanie sterownika nadrzędnego w zależności od energii w zasobniku E i aktualnej ceny energii proponowanej przez OHT, C_{OHT} . Przykładowo przy jej wysokiej wartości ($C_{OHT} > C_{OPLS}$) możliwe jest sprzedawanie energii z równoczesnym wykorzystaniem odbiorników sterowanych (gdy $E > E_R$), sprzedawanie energii z odłączaniem odbiorników (gdy $E_R > E > E_L$) lub samo sterowanie odbiornikami energii, przy $E_L > E$. W przypadku niższej ceny energii ($C_{OHT} < C_{OPLS}$) od sprzedaży istotniejsze jest zasilanie odbiorników u prosumenta i sprzedaż jedynie nadwyżki energii. Przy niskich cenach energii ($C_{OHT} < C_{OPLZ}$) należy wykorzystać możliwość doładowywania zasobnika energii.



Rys. 10. Przebiegi mocy w przekształtniku AC/DC pracującym w pętli regulacji niezależnym zadawaniem mocy czynnej i biernej

Tab. 1 Przykładowy algorytm kształtowania profilu mocy w punkcie przyłączenia PME.

	$C_{OHT} > C_{OPLS}$	$C_{OHT} < C_{OPLS}$, $C_{OHT} > C_{OPLZ}$	$C_{OHT} < C_{OPLZ}$
$E > E_R$	Sprzedaż nadwyżki	Sprzedaż nadwyżki	Sprzedaż nadwyżki
$E_R > E > E_L$	Sprzedaż z odłączaniem odbiorników	Sprzedaż nadwyżki	Ładowanie zasobnika
$E < E_L$	Odłączanie odbiorników	Odłączanie odbiorników	Ładowanie Zasobnika

Przedstawiony w tab. 1 algorytm sterowania stanowi swoistą bazę reguł. Przyjmując, że poziomom cen energii i poziomom naładowania zasobnika będą odpowiadały zbiory rozmyte możliwe jest wykorzystanie do określania poziomów profili mocy w punkcie przyłączenia logiki rozmytej.

Alternatywny algorytm do określania mocy pobieranej/generowanej w punkcie przyłączenia mógłby bazować na funkcji odcinkowo liniowej zależnej od ceny energii wynikającej z taryfy dynamicznej z dodatkową korektą wynikającą z poziomu energii w zasobniku. Dzięki temu możliwe byłoby niezależne określanie profilu mocy i realizacja bilansowania energii opisana w [\[Michalak\]](#).

5. Regulacja w trybie off-grid

W trybie pracy off-grid rozważyć należy dwa zasadnicze przypadki. Pierwszy zachodzi gdy przekształtnik AC/DC zasila jedynie odbiorniki. Drugi natomiast zachodzi gdy przekształtnik AC/DC współpracuje w ramach pracy wyspowej z innymi przekształtnikami lub makrogeneratorem.

W pierwszej sytuacji interfejs PME pracuje tak, jak to zostało opisane szczegółowo w rozdziale 3, to znaczy generuje napięcia zadane na zaciskach odbiorników o częstotliwości wynikającej z wewnętrznego generatora bazującego na precyzyjnym zegarze taktującym w mikroprocesorowym układzie sterowania. Amplituda napięcia na zaciskach odbiornika regulowana jest tak aby przy zmianach obciążenia zmiany napięcia były jak najszybciej tłumione. W tym przypadku przekształtnik AC/DC dostarcza, poza mocą czynną wymaganą przez odbiorniki moc bierną oraz generuje odpowiednie harmoniczne. W przypadku nadwyżki mocy generowanej w źródłach OZE w stosunku do aktualnego zapotrzebowania odbiorników ładowany jest zasobnik. Gdy zasobnik zostanie naładowany maksymalnie, możliwe jest załączanie sterowanych odbiorników w celu wykorzystania energii ze źródeł, gdy mimo odbiorniki dalej nie zbilansują produkcji energii wymagane jest wyłączenie źródła OZE lub ograniczenie jego mocy. W przypadku niedoboru energii generowanej ze źródeł w celu wydłużenia pracy odbiorników energii o wyższym priorytecie należy odłączać od zasilania odbiorniki o niższych priorytetach.

Przy pracy na sieć wydzieloną, składającą się z kilku interfejsów PME lub współpracy interfejsu PME z mikrogeneratorem (generatorem synchronicznym/ agregatem prądotwórczym), przekształtnik AC/DC w interfejsie PME musi uwzględniać pracę pozostałych układów. Sterowanie takie jest znacznie bardziej złożone od opisanego pierwszego przypadku. W sieci wydzielonej z wszystkie mikroźródła (przekształtniki/generatory) powinny tak współpracować ze sobą aby możliwe było efektywne i szybkie zbilansowanie mocy czynnej i biernej w wydzielonej wyspie składające się z mikroźródeł i odbiorników. Takie zbilansowanie możliwe jest do osiągnięcia dzięki zastosowaniu odpowiednich charakterystyk ze sterowaniem uchybów napięcia i częstotliwości. Uchyb napięcia i częstotliwości wpływa na wartości zadane w algorytmie regulacji przedstawionym w rozdziale 3 (na podstawie amplitudy napięcia i częstotliwości wyznaczone są składowe d, q sygnałów zadanych i mierzonych w układzie wirującym). Charakterystyki uchybów mają znaczący wpływ na zbilansowanie mocy czynnej i biernej pomiędzy źródłami podłączonymi do wyspy/autonomicznej mikrosieci. Kształt charakterystyk zależy jest od zainstalowanych źródeł współpracujących w wyspie oraz ustaleń określonych przez operatora systemu dystrybucyjnego OSD. Charakterystyki sterowania uchybami napięcia i częstotliwości mogą być zbliżone do tych jakie stosowane są w przekształtnikach solarnych przeznaczonych do pracy w trybie wyspowej off-grid, czyli funkcji liniowych (7) i (8).

$$U_m = U_{mn} + m \left(\frac{Q}{Q_n} \right) \quad (7)$$

$$f = f_n + n \left(\frac{P}{P_n} \right) \quad (8)$$

gdzie:

- m, n są odpowiednio współczynnikami stromości charakterystyk uchybu napięciowego i częstotliwościowego,
- Q, P są aktualnymi wartościami mocy biernej i czynnej w punkcie przyłączenia interfejsu PME,
- Q_n, P_n są znamionowymi lub maksymalnymi wartościami mocy biernej i czynnej interfejsu PME,
- U_m jest amplitudą napięcia aktualnie realizowanego przez interfejs PME,
- f jest częstotliwością aktualnie realizowaną przez interfejs PME,
- f_n, U_{mn} są znamionowymi wartościami częstotliwości i amplitudy napięcia,

Podsumowanie

W niniejszym opracowaniu przedstawiono zagadnienia związane ze sterowaniem przekształtnikiem AC/DC w mikroinfrastrukturze PME oraz wykorzystaniem funkcji regulacji w przekształtniku. Możliwość regulacji mocy pozwala realizować dodatkowe funkcjonalności PME z punktu widzenia OHT.

W pierwszej części opracowania skupiono się na zagadnieniach związanych ze sterowaniem i właściwościami dynamicznymi wewnętrznych algorytmów sterowania prądem wejściowym (w trybie on-grid) oraz napięciem na zaciskach odbiorników (w trybie off-grid). Z przeprowadzonej analizy wynika, że dynamika kształtowania prądu i napięcia jest na poziomie pojedynczych milisekund, co pozwala na realizację założonych funkcji dodatkowych.

W kolejnej części opracowania omówiono ideę i proponowane możliwości wykorzystania właściwości dynamicznych przekształtnika AC/DC do realizacji funkcji dodatkowych związanych z regulacją mocy w przypadku pracy interfejsu PME w wirtualnej wyspie oraz pracą w trybie off-grid interfejsu PME. W przypadku pracy interfejsu PME w wirtualnej wyspie operator OHT stara się utrzymać zerowe przepływy mocy w punktach bilansujących na połączeniu z systemem elektroenergetycznym. Bilansowanie mocy wymaga możliwości wpływania na źródła wytwórcze podłączone do wirtualnej wyspy, co odbywa się poprzez sygnał cenowy (taryfę dynamiczną). W opracowaniu zaproponowano przykładowy schemat działania interfejsu PME zapewniający odpowiednie kształtowanie profilu mocy w punkcie przyłączenia interfejsu PME do sieci w oparciu o zadane przez użytkownika parametry. Schemat działania bazuje na cenie energii oraz ilości energii zgromadzonej w zasobniku. Wewnętrzne bilansowanie energii w infrastrukturze PME odbywa się w celu utrzymania zadanego profilu mocy.

W trybie off-grid działanie przekształtnika AC/DC zależy od tego czy przekształtnik ten pracuje w ramach wyspy niezależnie, czy też w ramach wyspy pracuje kilka mikroźródeł. W pierwszym przypadku dąży się do utrzymania znamionowych wartości amplitudy i częstotliwości napięcia zasilającego odbiorniki. W drugim przypadku wartości zadane amplitudy i częstotliwości kształtowane są tak, aby rozdzielić obciążenia na poszczególne mikroźródła oraz zbilansować moce w całej wyspie w celu utrzymania napięć i częstotliwości w punkcie przyłączenia odbiorników.

Literatura

[Popczyk, Zygmantowski, Michalak, Kielan, Fice] Popczyk J., Zygmantowski M., Michalak J., Kielan P., Fice M.: [Koncepcja prosumenckiej mikroinstalacji energetycznej \(PME\) wg iLab EPRO](#). BŻEP. Dział 1.2.09. , [www.klaster3x20.pl](#), podstrona CEP

[Popczyk] Popczyk J.: [MODEL INTERAKTYWNEGO RYNKU ENERGII ELEKTRYCZNEJ. Od modelu WEK-NI-EP do modelu EP-NI-WEK](#). BŻEP. Dział 1.1.06. , [www.klaster3x20.pl](#), podstrona CEP

[Michalak] Michalak J.: [Bilansowanie energii w mikroinfrastrukturze PME](#). BŻEP. Dział 1.2.07., [www.klaster3x20.pl](#), podstrona CEP

[Casadei] Casadei D., Grandi G., Reggiani U., Rossi C.: *Power Quality and Reliability Supply Improvement Using a Power Conditioning System with Energy Storage Capability*, Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, IEEE-ISIE 2004, France, 4-7 May 2004

[Wojciechowski] Wojciechowski D.: *Grid voltages sensorless control system of the PWM rectifier with active filtering function*, 4th International Workshop Compatibility in Power Electronics, Gdynia, 1-3.6.2005

[Malinowski] Malinowski M.: *Sensorless Control Strategies for Three-Phase PWM Rectifiers*, rozprawa doktorska, Warszawa 2001

[Tunia] Tunia H., Kaźmierkowski M.P.: *Podstawy automatyki napędu elektrycznego*, PWN, Warszawa-Poznań 1978

Księga Szkoła

Teza. Przedstawiona w Raporcie analiza właściwości regulacyjnych przekształtnika AC/DC sprzęgającego infrastrukturę PME (obejmującą odbiorniki, źródła OZE i zasobnik) z siecią elektroenergetyczną (z KSE) dobitnie pokazuje przewagę możliwości regulacyjnych infrastruktury PME nad możliwościami regulacyjnymi KSE, głównie w obszarze regulacji pierwotnej KSE (dla regulacji wtórnej z kolei bardzo efektywnym substytutem na interaktywnym rynku energii elektrycznej jest taryfa dynamiczna, traktowana jako sygnał sterowniczy kształtujący gospodarkę elektroenergetyczną w ramach infrastruktury PME). Przewaga ta ma dalekosiężne skutki, mianowicie jest jednym z argumentów na rzecz tezy, że za pomocą głębokiej decentralizacji usług systemowych w KSE można już rozpocząć proces przełamania najsilniejszego ograniczenia technicznego, które blokowało dotychczas wejście rynku energii elektrycznej w kolejny, radykalny etap decentralizacji.

Zadanie do rozwiązania. Aby efektywnie wykorzystać prosumenckie, a także niezależnych inwestorów (NI), zasoby regulacyjne do przyspieszenia decentralizacji rynku energii elektrycznej konieczne jest pilne rozpoczęcie badań, głównie w aspekcie technicznym, nad potencjałem konwergencji dwóch obszarów: regulacji mocy (obszar technicznych usług systemowych) i bilansowania energii (do celów transakcyjnych na rynku energii elektrycznej); podkreśla się, że skracanie czasów transakcyjnych w taryfie dynamicznej oznacza zmniejszanie wolumenu usług systemowych. Zadanie to, przełożone na praktykę (uwzględniając współczesne polskie realia), oznacza przede wszystkim modelowanie wirtualnej wyspy WW. Chodzi przy tym o modelowanie w aspekcie alokacji zasobów regulacyjnych pomiędzy inwestorów NI (posiadających źródła bilansujące, takie np. jak źródło biogazowe z komorą fermentacyjną biogazowni zintegrowaną z dużym zasobnikiem biogazu) i prosumenckich (por. Raport Popczyk [Model Interaktywnego Rynku Energii Elektrycznej](#). BŻEP, Dział 1.1.06); to głównie w wyspie WW będzie się dokonywać optymalna alokacja tych zasobów, bo wyspa WW stanowi swoisty greenfield na którym kooperacyjna strategia współdziałania inwestora NI oraz prosumenta jest korzystna dla obydwu stron. Dla energetyki WEK, której interes polega na ograniczaniu konkurencji na rynku energii elektrycznej, alokacja zasobów regulacyjnych na nowe obszary jest oczywiście

zagrożeniem. Dlatego energetyka WEK będzie stosowała w najbliższym czasie bardzo ostrą strategię konfrontacyjną względem inwestorów NI i prosumentów.
Jan Popczyk

Datowanie RAPORTU (wersja oryginalna) – 28.06.2015 r.