

Network code dla wysokonapięciowych instalacji prądu stałego – – wybrane aspekty implementacji w KSE

Mateusz Szablicki, Piotr Rzepka - Politechnika Śląska, PSE Innowacje
Patrik Mazek, Robert Kielak - PSE

Streszczenie

Wprowadzenie Rozporządzenia Komisji Unii Europejskiej 2016/1447 z dnia 26 sierpnia 2016 r., ustanawiającego kodeks sieci dotyczący wymogów w zakresie przyłączenia systemów wysokiego napięcia prądu stałego oraz modułów parku energii z podłączeniem prądu stałego, nakłada na operatorów sieci elektroenergetycznych (systemów elektroenergetycznych) poszczególnych krajów członkowskich obowiązek opracowania zapisów dookreślających wymogi zawarte w tym Rozporządzeniu. W niniejszym referacie przedstawiono charakterystykę zakresu tematycznego Rozporządzenia, zestawiono sugestie implementacyjne sformułowane przez ENTSO-E oraz zamieszczono opis ogólnych i szczegółowych czynników determinujących kształtowanie zapisów dookreślających wymogi Rozporządzenia.

1. Idea kodeksów sieci

Sukcesywne działania Unii Europejskiej (UE), związane z dążeniem do liberalizacji rynku wewnętrznego energii elektrycznej, doprowadziły do opracowania i opublikowania rozporządzeń Komisji UE ustanawiających kodeksy sieci. Dokumenty te stanowią narzędzie wdrażania jednolitego rynku energii elektrycznej w UE [9] – w ujęciu ogólnym kodeksy sieci formułują wspólne zasady funkcjonowania i zarządzania systemami elektroenergetycznymi krajów członkowskich UE. Celem ich publikacji jest m.in. eliminacja barier dla dalszej integracji rynku wewnętrznego. Zgodnie z Rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady Wspólnoty Europejskiej 2009/714 [1], kodeksy sieci obejmują następujące obszary tematyczne związane z elektroenergetyką:

- bezpieczeństwo i niezawodność sieci,
- przyłączenie do sieci, dostęp stron trzecich,
- zasady przejrzystości, wymiana danych i rozliczeń,
- procedury operacyjne w sytuacjach awaryjnych, alokacja zdolności i zarządzanie ograniczeniami,
- bilansowanie, w tym rezerwy mocy,
- harmonizowanie struktur taryf przesyłowych,
- efektywność energetyczna sieci.

Zestawienie kodeksów sieci przedstawiono w tab. 1.

Obszar regulacyjny	Tematyka kodeksu sieci/wytucznych	Status
Obszar rynkowy	Wytuczne dotyczące alokacji zdolności przesyłowych i zarządzania ograniczeniami przesyłowymi (NC CACM)	Rozporządzenie Komisji (UE) 2015/1222 z dn. 24 lipca 2015 r.
	Wytuczne dotyczące długoterminowej alokacji zdolności przesyłowych (NC FCA)	Rozporządzenie Komisji (UE) 2016/1719 z dn. 26 września 2016 r.
	Wytuczne dotyczące bilansowania (NC BAL)	Rozporządzenie Komisji (UE) 2017/2195 z dn. 23 listopada 2017 r.
Obszar przyłączeniowy	Wymogi dotyczące przyłączenia jednostek wytwórczych do sieci (NC RfG)	Rozporządzenie Komisji (UE) 2016/631 z dn. 14 kwietnia 2016 r.
	Wymogi dotyczące przyłączenia odbioru (NC DCC)	Rozporządzenie Komisji (UE) 2016/1388 z dnia 17 sierpnia 2016 r.
	Wymogi dotyczące przyłączenia do sieci systemów wysokiego napięcia prądu stałego oraz modułów parku energii z podłączeniem prądu stałego (NC HVDC)	Rozporządzenie Komisji (UE) 2016/1447 z dn. 26 sierpnia 2016 r.
Obszar operacyjny	Wytuczne dotyczące pracy systemu przesyłowego energii elektrycznej (SO GL)	Rozporządzenie Komisji (UE) 2017/1485 z dn. 2 sierpnia 2017 r.
	Kodeks sieci dotyczący stanu zagrożenia i stanu odbudowy systemów elektroenergetycznych (NC E&R)	Rozporządzenie Komisji (UE) 2017/2196 z dn. 24 listopada 2017 r.

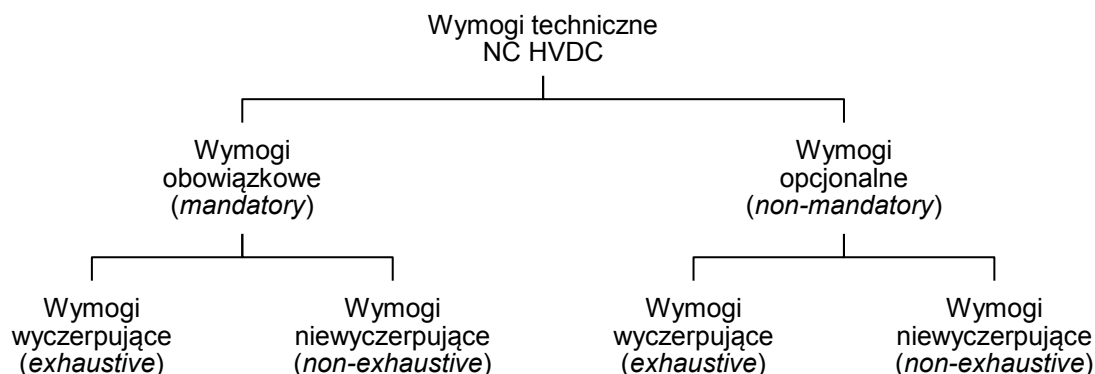
Tab. 1. Podział kodeksów sieci i Wytucznych Ramowych [9]

Jeden z kodeksów sieci – ustanowiony Rozporządzeniem Komisji (UE) 2016/1447 z dnia 26 sierpnia 2016 r. (rozporządzenie [2]) – określa wymogi dotyczące przyłączania do sieci systemów wysokiego napięcia prądu stałego oraz modułów parku energii z podłączeniem prądu stałego (kodeks ten jest zwykle oznaczany akronimem NC HVDC – patrz tabela 1). Rozporządzenie to zostało opublikowane w Dzienniku Urzędowym UE w dniu 8 września 2016 r. i weszło w życie z dniem 28 września 2016 r., przy czym stosowanie wymogów określonych w nim oraz na jego podstawie rozpocznie się trzy lata po jego publikacji, tj. od dnia 8 września 2019 r. NC HVDC definiuje zharmonizowane przepisy (wymagania techniczno-organizacyjne) dotyczące m.in.: procedur przyłączania wysokonapięciowych instalacji prądu stałego do sieci prądu przemiennego, współpracy z siecią (wymagania techniczne określające oczekiwane zachowanie się tych instalacji dla różnych stanów pracy instalacji i sieci), weryfikacji spełnienia postawionych wymagań (testy weryfikacji oraz zgodności). Zdefiniowano także sposób udzielania odstępstw od stosowania wymagań. Tym samym NC HVDC pomaga wprowadzić uczciwe warunki konkurencji na rynku wewnętrznym energii elektrycznej UE, zapewnić bezpieczeństwo sieci elektroenergetycznych oraz integrację odnawialnych źródeł energii elektrycznej, a także ułatwić obrót energią elektryczną w UE. Nakłada również wymogi zapewniające właściwe wykorzystanie zdolności wysokonapięciowych instalacji prądu stałego przez operatorów tych sieci w przejrzysty i niedyskryminacyjny sposób, w celu zapewnienia równych szans wszystkim podmiotom w całej UE.

Wymogi zdefiniowane w NC HVDC można podzielić na:

- wymogi obowiązkowe (mandatory) / opcjonalne (non-mandatory),
- wymogi wyczerpujące (exhaustive) / niewyczerpujące (non-exhaustive).

Zestawienie wskazanej kwalifikacji przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Kwalifikacja wymogów technicznych NC HVDC

Wymogi obowiązkowe i wyczerpujące nie wymagają dodatkowej implementacji krajowej, tj. formułowania przez operatorów sieci elektroenergetycznych krajów członkowskich UE zapisów dookreślających rozporządzenia Komisji (UE) wprowadzające kodeksy sieci. Natomiast wymogi opcjonalne lub niewyczerpujące wymagają ich opracowania przez właściwych operatorów w ramach krajowej implementacji. Wymogi te można podzielić na:

- wymogi ogólnego stosowania (general level) dotyczące wszystkich instalacji objętych rozporządzeniem [2],
- wymogi specyficzne (project specific) dotyczące konkretnych instalacji objętych rozporządzeniem [2], które będą określane indywidualnie dla każdej instalacji.

Podczas krajowej implementacji NC HVDC, w toku dookreślania zapisów zawartych w rozporządzeniu [2], które ustanawia NC HVDC, operatorzy sieci elektroenergetycznych mogą uwzględnić swoje zróżnicowane oczekiwania względem systemów wysokiego napięcia prądu stałego oraz modułów parku energii z podłączeniem prądu stałego, podyktowane niejednakowym podejściem do prowadzenia ruchu sieciowego w podległych im sieciach. Do sformułowania zapisów dookreślających rozporządzenie [2] operatorzy mogą wykorzystać m.in. własne doświadczenia z wysokonapięciowymi instalacjami prądu stałego, wyniki badań wykonanych przez ośrodki naukowo-badawcze, czy też niewiążące wytyczne opracowywane przez ENTSO-E. Należy zauważyć, że obszar tematyczny NC HVDC stanowi pewne novum w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym (KSE), gdyż dotychczasowe Instrukcje Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej/Dystrybucyjnych nie zawierały zapisów wprost określających pełne wymagania dla tego typu instalacji (analogiczna sytuacja ma miejsce w większości krajów członkowskich UE).

2. Niewiążące wytyczne ENTSO-E

Znaczna część wymagań technicznych zawartych w rozporządzeniu [2] ustanawiającym NC HVDC wymusza podjęcie przez operatorów sieci elektroenergetycznych krajów członkowskich UE działań dookreślających ich zapisy na poziomie krajowym w zakresie określonym w tym rozporządzeniu. Przedmiotami tych działań są [2]:

- opracowanie przez operatorów wymogów ogólnego stosowania dla wysokonapięciowych instalacji prądu stałego (systemów wysokiego napięcia prądu stałego i modułów parku energii z podłączeniem prądu stałego) w ramach wymogów dotyczących wszystkich instalacji objętych rozporządzeniem, które docelowo będą podlegać zatwierdzeniu przez krajowe organy regulacyjne, o ile państwo członkowskie nie postanowi inaczej [1] (dla KSE organem regulacyjnym [2] jest Urząd Regulacji Energetyki),
- opracowanie przez operatorów szczegółowych wymogów dotyczących konkretnych instalacji objętych rozporządzeniem, które to wymogi są określane przez właściwych operatorów na podstawie zapisów rozporządzenia,
- opracowanie i upublicznienie procedur operacyjnych i zasad dotyczących m.in. wydawania pozwoleń na użytkowanie, podziału obowiązków między operatorów a właścicieli instalacji w zakresie testowania, wykonywania symulacji na modelach i monitorowania spełnienia wymagań.

W celu ułatwienia formułowania zapisów dookreślających kodeksy sieci, ENTSO-E opracowało/opracowuje dedykowane niewiążące wytyczne dla najważniejszych zagadnień stanowiących przedmiot poszczególnych kodeksów sieci. Wytyczne te nazywają się ENTSO-E guidance document for national implementation for network codes on grid connection (często stosuje się akronim IGD). Dokumenty IGD zawierają niewiążące wytyczne implementacyjne przypisane do poszczególnych kodeksów sieci (także kodeksów sieci przynależnych do poszczególnych obszarów regulacyjnych – patrz tabela 1), z których mogą korzystać krajowi operatorzy sieci elektroenergetycznych. Przykładowe IGD to:

- Making non-mandatory requirements at European level mandatory in a country [6]
Dokument zawierający niewiążące wytyczne implementacyjne dotyczące wymogów opcjonalnych (non-mandatory) zdefiniowanych w rozporządzeniach Komisji (UE) ustanawiających kodeksy sieci z obszaru przyłączania do sieci (w tym w rozporządzeniu [2] ustanawiającym przedmiotowy NC HVDC). Dokument zawiera informacje oraz główne wskazówki dotyczące parametrów, jakie powinny zostać określone przy definiowaniu wymogów opcjonalnych w ramach krajowej implementacji kodeksów sieci z obszaru przyłączania do sieci elektroenergetycznych.
- Parameters of non-exhaustive requirements [7]
Dokument zawierający niewiążące wytyczne dotyczące kwalifikacji zapisów (artykułów) zdefiniowanych w rozporządzeniach Komisji (UE) ustanawiających kodeksy sieci z obszaru przyłączania do sieci, jako wymogów niewyczerpujących. Dokument zawiera informacje oraz główne wskazówki dotyczące parametrów, jakie powinny zostać określone przy definiowaniu wymogów niewyczerpujących w ramach krajowej implementacji kodeksów sieci z obszaru przyłączania do sieci elektroenergetycznych.
- Voltage related parameters for non-exhaustive requirements [8]
Dokument zawierający niewiążące wytyczne dotyczące kwalifikacji zapisów (artykułów) związanych z zagadnieniami napięciowymi zdefiniowanych w rozporządzeniach Komisji (UE) ustanawiających kodeksy sieci z obszaru przyłączania do sieci, jako wymogów niewyczerpujących. Dokument zawiera informacje oraz główne wskazówki dotyczące parametrów napięciowych, jakie powinny zostać określone przy definiowaniu wymogów niewyczerpujących w ramach krajowej implementacji kodeksów sieci z obszaru przyłączania do sieci elektroenergetycznych.

Podkreśla się, że działania podejmowane przez operatorów sieci elektroenergetycznych krajów członkowskich UE, zmierzające do zdefiniowania wymogów (zapisów) dookreślających rozporządzenia Komisji (UE) ustanawiające kodeksy sieci, powinny uwzględnić w należyty sposób opinie zainteresowanych stron. Opinie te są zbierane podczas konsultacji odbywających się przed przedłożeniem propozycji wymogów dookreślających do zatwierdzenia przez organ regulacyjny bądź, w stosownych przypadkach, państwo członkowskie. W odniesieniu do przedmiotowego NC HVDC takie podejście do implementacji rozporządzenia [2] ustanawiającego ten kodeks sieci pozwoli uwzględnić specyfikę pracy KSE przy formułowaniu oczekiwań względem wysokonapięciowych instalacji prądu stałego (systemy wysokiego napięcia prądu stałego i moduły parku energii z podłączeniem prądu stałego), przy jednoczesnym dążeniu do jak najpełniejszego wykorzystania możliwości technicznych wykazywanych przez tego typu instalacje do wspierania pracy KSE.

3. Wybrane aspekty kształtowania krajowych wymogów dookreślających

Wymogi dookreślające rozporządzenie [2] ustanawiające NC HVDC, sformułowane przez operatorów sieci elektroenergetycznych krajów członkowskich UE, będą determinować zachowanie się wysokonapięciowych instalacji prądu stałego podczas różnych stanów pracy zarówno tych instalacji, jak i sieci, w tym także skalę ich wsparcia dla sieci w działaniach stabilizujących warunki pracy tych sieci oraz zapewniających ich bezpieczną i niezawodną pracę w stanach normalnych i zakłóceń. Wskazuje to, że przy realizacji tego zadania operatorzy powinni jednoznacznie zdefiniować swoje oczekiwania względem systemów wysokiego napięcia prądu stałego oraz modułów parku energii z podłączeniem prądu stałego, które będą przyłączane do podległych im sieci elektroenergetycznych. Realizując powyższe dla KSE, przyjęto założenie o dążeniu do maksymalizacji wykorzystania możliwości technicznych wysokonapięciowych instalacji prądu stałego do wspierania pracy sieci elektroenergetycznych, przy jednoczesnym minimalizowaniu ewentualnych niekorzystnych zjawisk wywołanych przyłączeniem i pracą przedmiotowych instalacji. Niemniej, należy przy tym uwzględnić wymogi innych kodeksów sieci (patrz tab. 1), obostrzenia i wymogi dotychczas sformułowane dla instalacji wytwórczych i odbiorczych przyłączanych do sieci elektroenergetycznych podległych tym operatorom, dotychczasowe doświadczenia operatorów z wysokonapięciowymi instalacjami prądu stałego przyłączonymi do sieci, obostrzenia funkcjonalne wysokonapięciowych instalacji prądu stałego związane z ulokowaniem ich wewnątrz lub między obszarami regulacyjnymi oraz ograniczenia technologiczne poszczególnych technologii realizacji tych instalacji.

Przyjęte podejście do formułowania wymogów dookreślających w wielu sytuacjach powoduje konieczność niezależnego traktowania praktycznie każdego z wymogów przedmiotowego rozporządzenia [2] (w sensie wycinka problematyki objętej zapisami wymogu, niemniej z poszanowaniem także innych wymogów związanych z tą problematyką). W referacie wskazano szczegółowe czynniki determinujące kształtowanie zapisów dookreślających dla dwóch wybranych wymogów rozporządzenia [2], opisanych artykułem 11 ustęp 4 i artykułem 20 ustęp 1.

Artykuł 11 ustęp 4 – dopuszczalna redukcja mocy czynnej przesyłanej przez system wysokiego napięcia prądu stałego przy zaburzeniach częstotliwości w sieci elektroenergetycznej

Oryginalne brzmienie zapisów rozpatrywanego wymogu rozporządzenia [2] zamieszczono w tab. 2, wskazując przy tym kwalifikację wymogu oraz podmiot odpowiedzialny za opracowanie zapisów dookreślających, precyzując oczekiwania względem wysokonapięciowych instalacji prądu stałego przyłączanych do sieci elektroenergetycznej podległej temu podmiotowi.

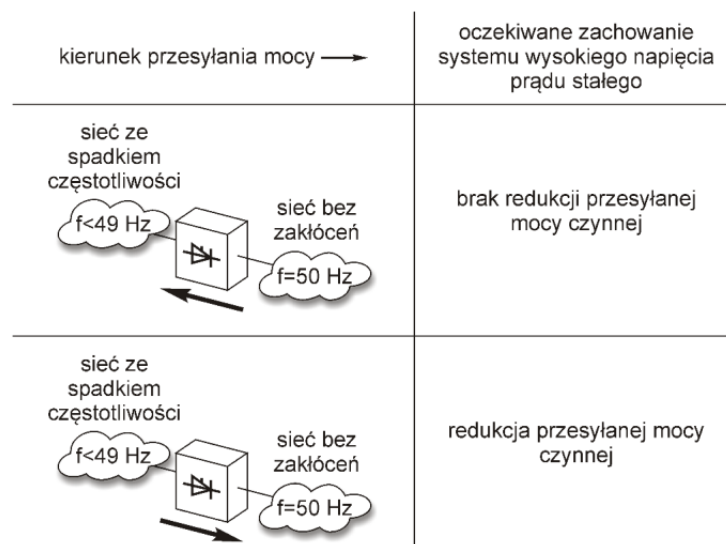
Zapisy Rozporządzenia
Właściwy OSP (aut.: operator systemu przesyłowego) może określić maksymalny dopuszczalny spadek generowanej mocy czynnej w stosunku do punktu pracy, jeśli częstotliwość systemu spadnie poniżej 49 Hz.
Kwalifikacja wymogu
<i>general level</i> (wymóg ogólnego stosowania), <i>non-mandatory</i> (wymóg opcjonalny)
Podmiot odpowiedzialny za opracowanie
operator systemu przesyłowego w danym kraju członkowskim UE

Tab. 2. Artykuł 11 ustęp 4 rozporządzenia [2]

Zapisy dookreślające przedmiotowy wymóg rozporządzenia [2] będą determinować zachowanie się systemów wysokiego napięcia prądu stałego w sytuacji zaistnienia zaburzenia w sieci elektroenergetycznej prowadzącego do spadku częstotliwości w tej sieci. W odniesieniu do rozpatrywanego wymogu ogranicza się to do przypadków zmniejszenia się wartości częstotliwości w stosunku do częstotliwości znamionowej poniżej progu 49 Hz (patrz tab. 2). Spadkowi częstotliwości w sieci elektroenergetycznej może towarzyszyć m.in. redukcja generacji mocy czynnej w modułach wytwarzania energii. Prowadzi to do dalszego pogłębienia zaburzenia częstotliwości, ponieważ redukcja generacji wywołuje coraz większe niebilansowanie mocy czynnej wytwarzanej i pobieranej w tej sieci, będącej jedną z determinant wartości częstotliwości. Dopuszczalny spadek zdolności generacji mocy czynnej przez moduły wytwarzania energii przy spadkach częstotliwości określa Rozporządzenie Komisji (UE) 2016/631 [3] (art. 13 ust. 4) oraz Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej (IRiESP) [5] (punkt 2.2.3.3.1.23 dla jednostek wytwórczych konwencjonalnych przyłączonych do sieci zamkniętej). Przywołane zapisy rozporządzenia [3] określają maksymalną dopuszczalną redukcję mocy czynnej w stosunku do maksymalnej generowanej mocy (zdefiniowanej dla częstotliwości znamionowej 50 Hz) na poziomie od 2%/Hz dla modułów parku energii do 10,0%/Hz dla synchronicznych modułów wytwarzania energii (wartość ta jest identyczna z wymogiem IRiESP dla jednostek wytwórczych konwencjonalnych przyłączonych do sieci zamkniętej). Tym samym od systemów wysokiego napięcia prądu stałego należałoby wymagać, aby zaburzenia częstotliwości w sieci nie wywoływały w tych systemach zmniejszenia poziomu przesyłanej mocy czynnej większego

niż dopuszczalne dla modułów wytwarzania energii przyłączanych do tej sieci. Realizacja tak postawionego wymogu jest wykonalna, ponieważ systemy wysokiego napięcia prądu stałego nie wykazują widocznej wrażliwości na zaburzenia częstotliwości w zakresie pojedynczych Hz [9], [12].

Zaznacza się jednak, że takie sformułowanie wymogu dookreślającego rozpatrywany artykuł rozporządzenia [2] jest zbyt uproszczone, ponieważ nie ujmuje oczekiwania zróżnicowanego zachowania się systemów wysokiego napięcia prądu stałego podczas spadku częstotliwości w sieci dla różnych kierunków przesyłania mocy czynnej między obszarami regulacyjnymi. To oczekiwane zachowanie systemów wysokiego napięcia prądu stałego zilustrowano na rys. 2.



Rys. 2. Oczekiwane zachowanie systemów wysokiego napięcia prądu stałego podczas spadku częstotliwości w sieci elektroenergetycznej

Przedstawione na rys. 2 oczekiwanie braku zmiany poziomu mocy przesyłanej przez system wysokiego napięcia prądu stałego w sytuacji, gdy moc czynna jest wprowadzana przez ten system do sieci prądu przemiennego z obniżoną częstotliwością z innego obszaru regulacyjnego (lub z fragmentu sieci, w którym przyłączone moduły wytwarzania energii nie wykazują redukcji mocy czynnej przy tym zaburzeniu częstotliwości) zapewni uzyskanie oczekiwanego od systemów wysokiego napięcia prądu stałego wsparcia częstotliwości w sieci elektroenergetycznej. Wówczas system wysokiego napięcia prądu stałego, poprzez utrzymanie poziomu przesyłanej mocy czynnej podczas spadku częstotliwości w tej sieci, będzie się przyczyniać do poprawy bilansu mocy czynnej wytwarzanej i pobieranej w tej sieci i umożliwi przeciwdziałanie lub przynajmniej spowolnienie dalszego spadku częstotliwości. Natomiast w sytuacji, w której moc czynna jest wyprowadzana przez ten system z sieci z obniżoną częstotliwością do innego obszaru regulacyjnego, brak redukcji poziomu przesyłanej mocy czynnej przyczyni się do dalszego pogłębiania się niebilansowania mocy czynnej wytwarzanej i pobieranej w tej sieci, ponieważ przy malejącej generacji mocy czynnej w modułach wytwarzania energii wartość mocy czynnej odbieranej z tej sieci przez system wysokiego napięcia prądu stałego nie zmniejszy się. Tym samym należy oczekiwać, że dla takiego kierunku przesyłania mocy spadkowi częstotliwości w sieci prądu przemiennego poniżej 49 Hz powinna towarzyszyć redukcja mocy czynnej eksportowanej z sieci o obniżonej częstotliwości. Poziom maksymalnej dopuszczalnej redukcji mocy czynnej przesyłanej przez system wysokiego napięcia prądu stałego powinien być ustalany indywidualnie dla każdego systemu, z uwzględnieniem przewidywanej skali redukcji mocy czynnej przez moduły wytwarzania energii przyłączone do sieci elektroenergetycznej. Przedstawione oczekiwanie zróżnicowanego zachowania się systemów wysokiego napięcia prądu stałego w sytuacji spadku częstotliwości w sieci elektroenergetycznej stanowi czynnik determinujący kształt zapisów dookreślających rozpatrywany wymóg rozporządzenia [2].

Artykuł 20 ustęp 1 – zdolność do zapewnienia wymiany mocy biernej przez system wysokiego napięcia prądu stałego z siecią elektroenergetyczną

Oryginalne brzmienie zapisów rozpatrywanego wymogu rozporządzenia [2] zamieszczono w tab. 3, wskazując przy tym kwalifikację wymogu oraz podmiot odpowiedzialny za opracowanie zapisów dookreślających, precyzujących oczekiwane względem wysokonapięciowych instalacji prądu stałego przyłączanych do sieci elektroenergetycznej podległej temu podmiotowi.

Zapisy Rozporządzenia
Właściwy operator systemu, w porozumieniu z właściwym OSP, określa wymogi w zakresie zdolności do generacji mocy biernej w punktach przyłączenia, w funkcji zmian napięcia. Propozycja dotycząca tych wymogów obejmuje profil $U-Q/P_{max}$, w granicach którego stacja przekształtnikowa HVDC (aut.: ang. <i>High Voltage Direct Current</i>) musi mieć zdolność do zapewnienia mocy biernej przy maksymalnej zdolności przesyłowej mocy czynnej HVDC.
Kwalifikacja wymogu
<i>general level</i> (wymóg ogólnego stosowania), <i>non-exhaustive</i> (wymóg niewyczerpujący, niepełny).
Podmiot odpowiedzialny za opracowanie
Właściwy operator systemu dla punktu przyłączenia stacji przekształtnikowej HVDC do sieci w porozumieniu z właściwym operatorem systemu przesyłowego w danym kraju członkowskim UE.

Tab. 3. Artykuł 20 ustęp 1 rozporządzenia [2]

Zapisy dookreślające przedmiotowy wymóg rozporządzenia [2] będą determinować zdolność systemów wysokiego napięcia prądu stałego do zmiany parametrów mocy biernej tego systemu w funkcji wartości napięcia w punkcie przyłączenia tego systemu do sieci elektroenergetycznej w całym zakresie regulacyjnym mocy czynnej, od minimalnej do maksymalnej zdolności przesyłowej mocy czynnej tego systemu, określonej przez P_{max} .

Do czynników determinujących kształt zapisów dookreślających można zaliczyć:

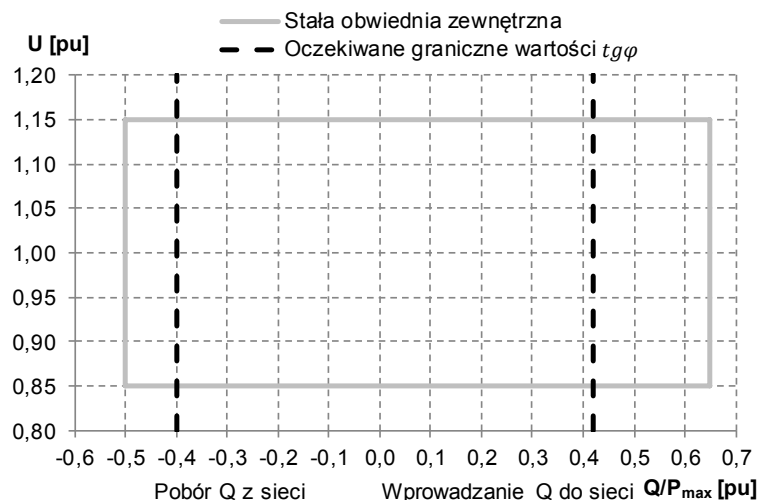
- obostrzenia sieci (wymagania odnośnie dopuszczalnych parametrów pracy sieci),
- obostrzenia systemów wysokiego napięcia prądu stałego (ograniczenia technologiczne),
- inne obostrzenia rozporządzenia [2].

Obostrzenia sieciowe określają m.in. oczekiwane wartości Q/P_{max} . W tab. 4 zestawiono wartości $\cos\varphi$ i $tg\varphi$, wynikające z zapisów rozporządzenia [3] oraz z zapisów IRiESP [5]. Decyduje to o oczekiwanych wartościach granicznych Q/P_{max} profilu $U-Q/P_{max}$ (granice profilu na osi odciętych) dla systemów wysokiego napięcia prądu stałego. Podkreśla się przy tym, że systemy te można traktować – w sensie obiektu elektroenergetycznego zapewniającego dwukierunkowe przesyłanie mocy – zarówno jako moduł wytwarzania energii, jak i instalację odbiorczą. Stąd w tab. 4 zestawiono wartości współczynników mocy dla modułów wytwarzania energii i odbiorczych przyłączanych do KSE (także w perspektywie długoterminowej objętej zapisami Rozporządzeń Komisji (UE) ustanawiających kodeksy sieci).

$\cos\varphi$ [pu]	$tg\varphi$ [pu]	Komentarz
+0,95	+0,33	Wymagana wartość $tg\varphi$ dla modułów parku energii i morskich modułów parku energii (rozporządzenie [3] – odpowiednio – art. 21 ust. 2 lit. b i art. 25 ust. 5) – tożsame z dotychczas wymaganą wartością $\cos\varphi$ dla farm wiatrowych przyłączanych do sieci zamkniętej (IRiESP [5] pkt. 2.2.3.3.3.6.2).
+0,93	+0,40	Wymagana wartość $tg\varphi$ dla odbiorców przyłączanych do sieci zamkniętej (IRiESP [5] pkt. 2.1.2.2.2).
+0,92	+0,42	Wymagana wartość $tg\varphi$ dla synchronicznych modułów wytwarzania energii (rozporządzenie [3] art. 18 ust. 2 lit. b) – tożsame z dotychczas wymaganą wartością $\cos\varphi$ dla jednostek wytwórczych konwencjonalnych przyłączanych do sieci zamkniętej przeliczoną z zacisków generatora na punkt przyłączenia z uwzględnieniem typowych parametrów układu wyprowadzenia mocy (IRiESP [5] pkt. 2.2.3.3.1.26).
-0,93	-0,40	Wymagana wartość $tg\varphi$ dla synchronicznych modułów wytwarzania energii (rozporządzenie [3] art. 18 ust. 2 lit. b) – tożsame z dotychczas wymaganą wartością $\cos\varphi$ dla jednostek wytwórczych konwencjonalnych przyłączanych do sieci zamkniętej przeliczoną z zacisków generatora na punkt przyłączenia z uwzględnieniem typowych parametrów układu wyprowadzenia mocy (IRiESP [5] pkt. 2.2.3.3.1.26).
-0,95	-0,33	Wymagana wartość $tg\varphi$ dla modułów parku energii i morskich modułów parku energii (rozporządzenie [3] – odpowiednio – art. 21 ust. 2 lit. b i art. 25 ust. 5) – tożsame z dotychczas wymaganą wartością $\cos\varphi$ dla farm wiatrowych przyłączanych do sieci zamkniętej (IRiESP [5] pkt. 2.2.3.3.3.6.2).

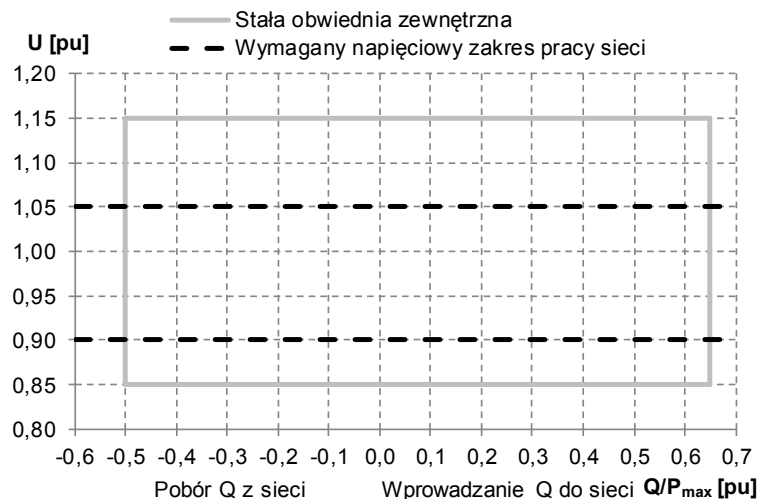
Tab. 4. Wymagane wartości wskaźników dotyczących Q/P dla modułów wytwarzania energii i instalacji odbiorczych przyłączanych do sieci zamkniętej KSE

Spośród danych zestawionych w tab. 4 skrajnie dodatnie i skrajnie ujemne wartości $t_{g\varphi}$ wprost określają, jakie granice Q/P_{\max} profilu U- Q/P_{\max} powinno się przyjmować przy definiowaniu zapisów dookreślających. Należy przy tym uwzględnić, że wartości graniczne Q/P_{\max} nie mogą wykraczać poza dopuszczalny wymiar obwiedni wewnętrznej zdefiniowanej w przedmiotowym rozporządzeniu, tj. $-0,5$ pu i $+0,65$ pu, a zakres Q/P_{\max} musi być nie większy niż $0,95$ pu. Powyższe zilustrowano na rys. 3.



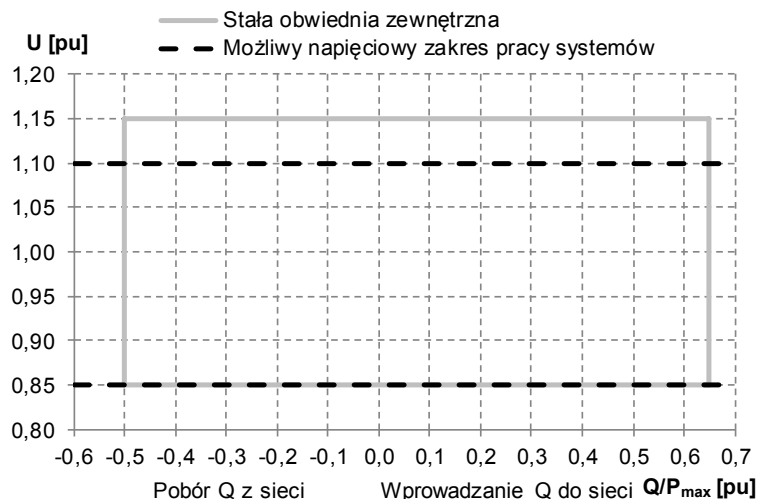
Rys. 3. Oczekiwane granice profilu U- Q/P_{\max} na osi odciętych

Obostrzenia sieciowe definiują także limity zakresu napięciowego profilu U- Q/P_{\max} (granice profilu na osi rzędnych). Dla sieci 110 kV i 220 kV dopuszczalny zapisami art. 27 Rozporządzenia Komisji (UE) 2017/1485 [4] zakres wartości napięcia podczas stanu ustalonym w normalnych warunkach pracy sieci wynosi $0,9 \div 1,118$ pu, natomiast dla sieci 400 kV $0,9 \div 1,05$ pu. Wprost określa to granice napięciowe profilu U- Q/P_{\max} , które powinno się uwzględnić przy definiowaniu zapisów dookreślających rozpatrywany wymóg rozporządzenia [2]. Należy przy tym uwzględnić, że wartości graniczne napięcia profilu nie mogą wykraczać poza dopuszczalny wymiar obwiedni wewnętrznej zdefiniowanej w przedmiotowym rozporządzeniu, tj. $0,85$ pu i $1,15$ pu. Powyższe zilustrowano na rys. 4.



Rys. 4. Granice profilu U- Q/P_{\max} na osi rzędnych dla systemów wysokiego napięcia prądu stałego przyłączanych do sieci 400 kV określone na podstawie wymaganego rozporządzeniem [4] napięciowego zakresu pracy sieci w stanie ustalonym dla normalnych warunków pracy sieci

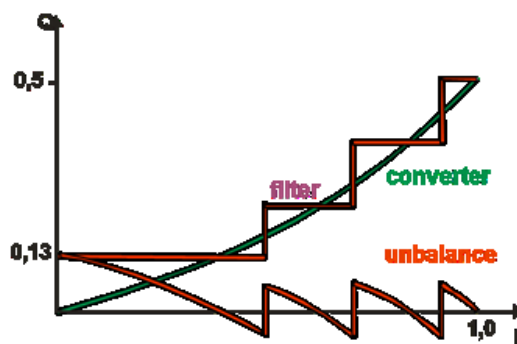
Niemniej podkreśla się, że systemy wysokiego napięcia prądu stałego wykazują szerszy napięciowy zakres pracy, co zostało uwzględnione w rozporządzeniu [2]. Dla systemów przyłączanych do sieci 110 kV i 220 kV wymagany zapisami art. 18 rozporządzenia [2] zakres wartości napięcia wynosi $0,85 \div 1,15$ pu, natomiast dla systemów przyłączanych do sieci 400 kV $0,85 \div 1,10$ pu (z pewnymi obostrzeniami czasu pracy). Powyższe zilustrowano na rys. 5.



Rys. 5. Możliwy napięciowy zakres pracy systemów wysokiego napięcia prądu stałego przyłączanych do sieci 400 kV określony na podstawie wymaganego rozporządzeniem [2] napięciowego zakresu pracy tych systemów w stanie ustalonym dla normalnych warunków pracy sieci

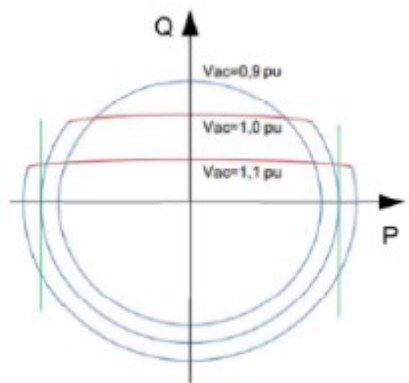
Zidentyfikowane szersze możliwe zakresy napięciowe systemów wysokiego napięcia prądu stałego sugeruje się traktować jako środek wspomagania regulacji napięcia w sieci elektroenergetycznej w krytycznych sytuacjach przekroczenia wartości dopuszczalnych przedstawionych na rys. 4. Jednocześnie przedstawiony na rys. 5 możliwy napięciowy zakres pracy systemów wysokiego napięcia prądu stałego pozwala pokryć zakres napięciowy pracy modułów wytwarzania energii określony w rozporządzeniu [3]. Jednak należy przy tym uwzględnić, że zakres napięciowy profilu $U-Q/P_{\max}$ (dopuszczalny wymiar obwiedni wewnętrznej profilu na osi rzędnych) musi być nie większy niż 0,225 pu – ograniczenie sformułowane w rozporządzeniu [2].

Definiując oczekiwany kształt profilu $U-Q/P_{\max}$, należy również uwzględnić obostrzenia technologiczne systemów wysokiego napięcia prądu stałego. Systemy zrealizowane w technologii LCC lub CSC (CCC) nie wykazują „naturalnych” zdolności do regulacji wymiany mocy biernej z siecią elektroenergetyczną niezależnie od regulacji mocy czynnej. Poziom mocy biernej pobieranej przez te systemy z sieci jest praktycznie proporcjonalny do poziomu przesyłanej mocy czynnej [12], [13]. Celem redukcji tego poboru w systemach LCC i CSC instaluje się dedykowane, przełączalne zespoły baterii kondensatorów statycznych, jednak nie można ich traktować jako środków pozwalających na płynną i niezależną regulację mocy biernej stacji przekształtnikowej systemów. Ilustruje to rys. 6.



Rys. 6. Typowa wymiana mocy biernej między siecią elektroenergetyczną a systemem wysokiego napięcia prądu stałego zrealizowanym w technologii LCC (przebieg unbalance) [14], [15]

Płynna i niezależna regulacja mocy biernej stacji przekształtnikowej systemu wysokiego napięcia prądu stałego jest możliwa w systemach zrealizowanych w technologii VSC (patrz rys. 7). Jedynek czynnikiem ograniczającym jest wartość napięcia – wyłącznie w trybie „wstrzykiwania” mocy biernej do sieci prądu przemiennego (na rysunku 7 obrazują to krzywe oznaczone jako V_{ac}). Wprowadza to potencjalne ograniczenie profilu $U-Q/P_{\max}$ w obszarze dodatnich wartości Q/P i napięć przekraczających 0,9 pu.



Rys. 7. Typowa charakterystyka mocy dla systemów wysokiego napięcia prądu stałego zrealizowanych w technologii VSC [11], [12], [16]

Zidentyfikowane obostrzenia determinują możliwy kształt profilu U - Q/P_{\max} dla systemów wysokiego napięcia prądu stałego, tym samym stanowią zestaw czynników, które powinno się uwzględnić przy formułowaniu zapisów dookreślających rozpatrywany wymóg rozporządzenia [2].

4. Podsumowanie

Wprowadzenie Rozporządzeń Komisji (UE), regulujących wiele aspektów pracy sieci elektroenergetycznych poprzez formułowanie wymogów odnośnie oczekiwanego zachowania się różnych instalacji elektroenergetycznych (także obiektów i systemów towarzyszących tym instalacjom) przyłączanych do tych sieci, stanowi wyzwanie dla operatorów sieci elektroenergetycznych krajów członkowskich UE. Jednym z tych wyzwań jest konieczność dookreślenia wymogów zawartych w przedmiotowych rozporządzeniach. Przez dookreślenie rozumie się sformułowanie zapisów w pełni precyzujących wymagania stawiane instalacjom objętym danym rozporządzeniem, w ograniczeniu do przedmiotu danego wymogu. Należy zwrócić uwagę, że w niektórych aspektach pracy sieci elektroenergetycznych przedmiotowe rozporządzenia mogą zmieniać dotychczasowe podejście do funkcjonowania tych sieci (w tym sposobu prowadzenia ruchu sieciowego). Niemniej, poprzez odpowiednie kształtowanie wymogów dookreślających operatorzy sieci elektroenergetycznych mogą dążyć do maksymalizacji wykorzystania możliwości technicznych przyłączanych instalacji elektroenergetycznych do wspierania pracy sieci, przy jednoczesnym minimalizowaniu ewentualnych niekorzystnych zjawisk wywołanych przyłączeniem i pracą przedmiotowych instalacji. Należy przy tym uwzględnić m.in.: wymogi innych rozporządzeń Komisji (UE), obostrzenia i wymogi dotychczas formułowane dla modułów wytwarzania energii i instalacji odbiorczych przyłączanych do sieci elektroenergetycznych podległych tym operatorom oraz ograniczenia technologiczne poszczególnych rodzajów przyłączanych instalacji. Dodatkowo, w niektórych przypadkach zdefiniowanie wymogów dookreślających może wymagać przeprowadzenia szczegółowych badań symulacyjnych (jest to nieodzowne w sytuacji braku doświadczeń operatora w przedmiocie opracowywanego wymogu) [17], [18], [19].

Literatura

- [1] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 714/2009 z dnia 13 lipca 2009 r. w sprawie warunków dostępu do sieci w odniesieniu do transgranicznej wymiany energii elektrycznej i uchylające rozporządzenie (WE) nr 1228/2003.
- [2] Rozporządzenie Komisji (UE) 2016/1447 z dnia 26 sierpnia 2016 r. ustanawiające kodeks sieci określający wymogi dotyczące przyłączenia do sieci systemów wysokiego napięcia prądu stałego oraz modułów parku energii z podłączeniem prądu stałego.
- [3] Rozporządzenie Komisji (UE) 2016/631 z dnia 14 sierpnia 2016 r. ustanawiające kodeks sieci dotyczący wymogów w zakresie przyłączenia jednostek wytwórczych do sieci.
- [4] Rozporządzenie Komisji (UE) 2017/1485 z dnia 2 sierpnia 2017 r. ustanawiające wytyczne dotyczące pracy systemu przesyłowego energii elektrycznej.
- [5] Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej. Warunki korzystania, prowadzenia ruchu, eksploatacji i planowania rozwoju sieci. Obowiązujące od dnia 1 lutego 2017 r.
- [6] ENTSO-E Guidance document for national implementation for network codes on grid connection. Making non-mandatory requirements at European level mandatory at national level – z dnia 16 listopada 2016 r.
- [7] ENTSO-E Guidance document for national implementation for network codes on grid connection. Parameters of Non-exhaustive requirements – z dnia 16 listopada 2016 r.

- [8] ENTSO-E guidance document for national implementation for network codes on grid connection. Parameters related to voltage issues – z dnia 16 listopada 2016 r.
- [9] Wytyczne ramowe i kodeksy sieciowe [on-line]. Urząd Regulacji Energetyki [dostęp 31 stycznia 2018 r.]. Dostęp w Internecie: <https://www.ure.gov.pl/>
- [10] Kodeksy Sieci i Wytyczne [on-line]. Polskie Sieci Elektroenergetyczne [dostęp 31 stycznia 2018 r.]. Dostęp w Internecie: <https://www.pse.pl/>
- [11] Elansari A.S., Finney S.J., Burr J., Edrah M.F.: Frequency control capability of VSC-HVDC transmission system. Materiały 11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, Birmingham, czerwiec 2015 r.
- [12] CIGRE Working Group B4.57. Guide for the Development of Models for HVDC Converters in a HVDC Grid, grudzień 2014 r.
- [13] AREVA. Back-to-Back HVDC Solutions, lipiec 2007 r.
- [14] Ramadan H.S.: Non-linear control and stabilization of VSCH-VDC transmission systems. Rozprawa doktorska, Zagazig University, Egipt, 2012 r.
- [15] Belmans R.: Meshed DC networks for offshore wind development. KULeuven, ESTA-ELECTA, 2010 r.
- [16] Oluwafemi E. Oni, Kamati I. Mbangula, Innocent E.: A Review of LCC-HVDC and VSC-HVDC Technologies and Applications. Transactions on Environment and Electrical Engineering, Nr 3, 2016 r.
- [17] Halinka A., Rzepka P., Szablicki M., Sowa P.: Dynamiczne modele stałoprądowego łącza B2B do badań zakłóceń niesymetrycznych – studium przypadku dla LitPol Link. Materiały XIX Ogólnopolskiej konferencji Zabezpieczenia przekaźnikowe w energetyce, Ożarów Mazowiecki, październik 2016 r.
- [18] Rzepka P., Szablicki M.: Obszarowy system detekcji SPZ jednofazowego w liniach sieciowego łącza HVDC jako skuteczny środek poprawy warunków komutacji w łączach LCC. Materiały XIX Ogólnopolskiej konferencji Zabezpieczenia przekaźnikowe w energetyce, Ożarów Mazowiecki, październik 2016 r.
- [19] Przygodzki M., Rzepka P., Szablicki M.: Analysis of opportunities to improve the HVDC SwePol Link operation due to commutation failures. Materiały 46 CIGRE Session International Council on Large Electric Systems, Paris, sierpień 2016 r.