

Transformacja sieci elektroenergetycznych w horyzoncie do roku 2050+

Transformation of electric power grids in the 2050+ horizon

Streszczenie. Transformacja sektora wytwarzania energii elektrycznej w kraju (jak i na świecie) potencjalnie prowadzi do zmiany struktury oraz funkcjonalności sieci elektroenergetycznych. Artykuł koncentruje się na przedstawieniu potencjalnego kierunku rozwoju krajowej sieci elektroenergetycznej przesyłowej i sieci dystrybucyjnych w horyzoncie czasowym do roku 2050+.

Abstract. Transformation in the electricity generation sector in Poland (and worldwide) potentially leads to changes in the structure and functionality of electric power grids. The paper focuses on presenting potential direction of development of transmission and distribution power systems networks in the time horizon of 2050+.

Słowa kluczowe: sieci elektroenergetyczne, odnawialne źródła energii, zarządzanie energią, elektroenergetyczne sieci rozdzielcze.

Keywords: power grid, renewable energy sources, energy management, power distribution network.

Wstęp

Sieci elektroenergetyczne strukturalnie odwzorowują geograficzne rozmieszczenie odbiorów i źródeł energii elektrycznej, uwzględniające moce zarówno odbiorów jak i źródeł. Obecnie znakomita większość klasycznych (węglowych) źródeł energii elektrycznej ulokowana jest na południe od linii Warszawa – Poznań. Odzwierciedla to lokalizację i koncentrację przemysłu, i tym samym pokrywa się z rozłożeniem ludności kraju.

Zmiana rozmieszczenia geograficznego źródeł energii lub odbiorów implikuje zmianę struktury sieci. Z taką zmianą w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym (KSE), jako wynik upowszechniania się Odnawialnych Źródeł Energii (OZE) oraz odchodzenia od paliw kopalnych (głównie węgla), mamy już do czynienia, a proces ten będzie się w przyszłości pogłębiał. Zmiany w KSE będą zatem polegały na [1, 2]:

- zmniejszeniu liczby bloków, i tym samym mocy zainstalowanej, elektrowni węglowych – południowa część KSE,
- częściowej kompensacji ubytku mocy w elektrowniach węglowych przez bloki gazowe i jądrowe (w tym SMR) budowane po części w lokalizacjach wyłączanych elektrowni węglowych lub bliskich im (południowa część KSE), a w części w lokalizacjach nowych (cały kraj).
- zwiększeniu mocy zainstalowanej lądowych elektrowni wiatrowych – północno-zachodnia część KSE,
- przyłączeniu nowych i dużych co do mocy znamionowej źródeł jak: morskie elektrownie wiatrowe oraz elektrownia jądrowa w Choczewie – północna część KSE,
- istotnym zwiększeniu mocy zainstalowanej elektrowni fotowoltaicznych – quasi-równomierny rozkład geograficzny,
- zwiększeniu poboru energii elektrycznej – quasi-równomierny rozkład geograficzny,
- upowszechnieniu się w całym KSE magazynów energii. Magazyny energii, w zależności od ich mocy i pojemności znamionowej, przyłączane będą do sieci na wszystkich poziomach napięć. Spodziewać można się głównie magazynów bateryjnych lub opartych na superkondensatorach (technologie opanowane), a w dalszej przyszłości bazujących na wytwornicach wodoru, metanu lub amoniaku, współpracujących z różnymi źródłami energii elektrycznej, np. ogniwami paliwowymi (technologie obecnie rozwijane). W KSE

spodziewać można się również co najmniej jednego nowego magazynu energii w postaci elektrowni szczytowo-pompowej.

Powyższe oznacza geograficzne przesunięcie się źródeł wytwórczych w stosunku do odbiorów i tym samym konieczność przesyłania energii elektrycznej z północy kraju na szeroko pojęte południe. Implikuje to konieczność dostosowania sieci elektroenergetycznych do tych zmian.

Konsekwencją geograficznej i technologicznej zmiany struktury źródeł i magazynów energii elektrycznej w KSE jest (i będzie) nie tylko konieczność przesyłu energii elektrycznej w kierunku północ-południe. Pojawia się (już zresztą występują) problemy z nadmiernymi napięciami, małymi prądami zwarciovymi i malejącą inercją systemu. Jest to dyskutowane poniżej.

Transformacja sieci elektroenergetycznych wysokiego napięcia

Źródła i magazyny energii o dużej mocy znamionowej, przyłączane będą (już zresztą są) do sieci wysokiego napięcia (WN), zastępując po części obecne klasyczne duże jednostki wytwórcze. Znacząco wzrośnie liczba źródeł i magazynów energii przyłączanych do sieci 110 kV, co spowoduje pewne rozproszenie źródeł wytwórczych w stosunku do stanu obecnego (pomijając koncentrację mocy wprowadzanej do KSE przez budowane morskie elektrownie wiatrowe i przyszłą elektrownię jądrową w Choczewie). Jak należy domniemywać, zasada zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego w kraju nie ulegnie zmianie, zatem sieci WN, tj. sieci 400 kV, 220 kV i 110 kV pozostaną sieciami odczkowymi przy zachowaniu wymogu pełnej ich obserwowalności i sterowalności. Rozwój tych sieci będzie polegał na zwiększaniu się liczby linii i stacji elektroenergetycznych i rozwoju ich technologii.

Wzrost penetracji systemu elektroenergetycznego przez OZE w sieci WN, w okresach dużej generacji mocy przez te źródła, prowadzi do zmniejszenia liczby pracujących źródeł klasycznych z generatorami synchronicznymi. To z kolei powoduje zmniejszenie inercji systemu (zmniejszenie energii zgromadzonej w masach wirujących turbo- i hydrozespołów). Dalej prowadzi to do wzrostu wahań częstotliwości w systemach elektroenergetycznych. Jednym z rozwiązań problemu jest tu stosowanie kompensatorów synchronicznych, szczególnie z odpowiednio dużymi masami wirującymi. Dodatkowo wsparciem może być tu tzw. sztuczna inercja, tj. odpowiednie algorytmy

implementowane w układach sterowania przekształtnikami energoelektronicznymi w OZE i magazynach energii.

Ponadto, zmniejszenie liczby źródeł energii z generatorami synchronicznymi na rzecz układów inwerterowych (OZE i magazynów energii) prowadzi do zmniejszenia wartości prądów zwarciovych w sieciach WN, co z kolei może prowadzić do ograniczenia pewności działania zabezpieczeń elektroenergetycznych (EAZ). Niewyłączenie elementu sieci, tj. linii, szyn zbiorczych, transformatorów, itd., przez automatykę EAZ potencjalnie, w skrajnym przypadku skutkujące kaskadowym rozwojem zakłócenia, może prowadzić w systemie elektroenergetycznym do blackout'u.

I dalej, wzrost nasycenia systemów OZE, i tym samym wprowadzanie mocy do węzłów ich przyłączenia, skutkuje wzrostem napięć w węzłach przyłączenia oraz w węzłach przylegających. Wzrost ten można skompensować poborem mocy biernej, co wymaga zastosowania układów kompensacji mocy biernej (zintegrowanych z źródłem energii lub odrębnych).

Podsumowując powyższe można stwierdzić, że zagrożenia dla pracy sieci WN można ograniczyć stosując opatrowane obecnie technologicznie urządzenia i systemy. Ponadto, biorąc pod wzgląd cechy pozytywne tych sieci jak: odporność strukturalną i funkcjonalną (zapewnianą przez SCADA, a w przyszłości systemy WAMS), dużą sprawność transportu energii oraz długi czas życia, można przewidywać, że sieci elektroenergetyczne WN funkcjonalnie i strukturalnie w przyszłości nie będą istotnie różniły się od sieci współczesnych. Rozbudowane zostaną natomiast systemy SCADA i ich algorytmy, które będą musiały uwzględniać bardzo dużą liczbą źródeł i magazynów energii.

Transformacja sieci elektroenergetycznych średniego i niskiego napięcia

Sieci elektroenergetyczne średniego (SN) i niskiego (nn) napięcia to obecnie sieci promieniowe lub pracujące promieniowo. Taka struktura i sposób pracy wynika z faktu, iż z punktu widzenia całego systemu elektroenergetycznego wyłączenie pojedynczej gałęzi sieci SN, a tym bardziej gałęzi sieci nn, nie niesie z sobą żadnych negatywnych konsekwencji dla bezpieczeństwa pracy systemu jako całości. Taka konfiguracja pracy sieci upraszcza automatykę zabezpieczeniową i redukuje koszty budowy i eksploatacji sieci ale prowadzi do braku jej odporności strukturalnej jak i funkcjonalnej. Sieci SN są obecnie w sporej części obserwowalne i częściowo sterowalne. Obserwowalność sieci nn jest natomiast bardzo ograniczona, pomimo rozwoju systemów AML, a sterowanie siecią nn nie jest praktycznie (poza niektórymi stacjami SN/nn) realizowane.

Wzrost nasycenia tych sieci przez OZE i magazyny energii prowadzi do występowania problemów technicznych zarówno po stronie operatorów sieci dystrybucyjnych (OSD) jak i po stronie odbiorców energii (w tym prosumentów):

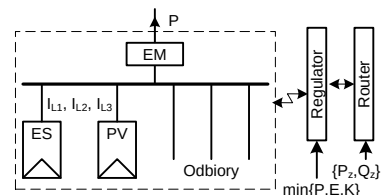
- Problemy postrzegane przez OSD to:
 - wzrost obciążenia sieci, co implikuje wzrost strat mocy i energii,
 - przepływy odwrotne mocy, co implikuje problemy z regulacją napięć transformatorami,
 - wzrost wahań napięć,
 - wzrost poziomu i niesymetrii napięć,
 - wzrost niesymetrii prądów,
 - pogorszenie jakości energii.
- Problemy postrzegane przez odbiorców energii i prosumentów:
 - małe wykorzystanie energii z własnego źródła,
 - wyłączanie się źródeł energii w wyniku działania

zabezpieczeń nadnapięciowych inwerterów,

- wyłączanie OZE przez OSD w dni słoneczne i wolne od pracy, zazwyczaj w kolejności: średnie – duże co do mocy źródła energii,
- dyskusyjna dokładność pomiaru energii przez współczesne liczniki energii w przypadku dużego odkształcenia prądu lub napięcia [3].

Rozwiązania powyższych problemów można upatrywać w następujących działaniach, które można traktować jako przewidywane kierunki rozwoju sieci elektroenergetycznych SN i nn:

- W zakresie struktury sieci i urządzeń:
 - funkcjonalne zamykanie pierścieni,
 - podniesienie napięcia znamionowego wybranych (np. nowych) sieci nn do wyższego niż 0,4 kV,
 - stosowanie sieci prądu stałego (wybrane fragmenty),
 - stosowanie transformatorów symetryzujących (Zn lub energoelektronicznych),
 - stosowanie magazynów energii różnego typu,
 - stosowanie cable-pooling.
- W zakresie zarządzania energią u prosumenta i ewentualnie odbiorcy:
 - Wykorzystanie internetu w systemach sterowania w sieciach SN i nn. System PLC, stosowany obecnie głównie dla potrzeb AML, nie nadaje się do ciągłego i szybkiego sterowania inwerterami. Można przyjąć, że dla potrzeb sterowania w obrębie urządzeń prosumenta (w tym odbiorami typu lodówka, żelazko, pompa ciepła itp.) wykorzystywany będzie internet. System zarządzania energią będzie realizował różne funkcje dla potrzeb prosumenta (np. optymalizacja kosztów energii), ale również będzie mógł realizować funkcje na rzecz OSD. System ten będzie komunikował się z urządzeniami bezprzewodowo (WiFi), a algorytm sterownika może być ulokowany na komputerze prosumenta lub na zewnętrznym serwerze (OSD lub innego podmiotu). Strukturę systemu przedstawiono na rysunku 1.
 - Profilowanie odbiorcy energii elektrycznej i prosumenta w celu efektywnego zarządzania OZE, magazynami energii i odbiorami.
 - Wykrywanie uszkodzeń OZE, magazynów energii, hydrolizerów, ogniw paliwowych, itd.
 - Optymalizacja nastaw inwerterów OZE, magazynów energii, inwerterów i ogniw paliwowych.
 - Sterowanie odbiorami w sieci nn (w tym DSM, DSR).



Rys. 1. Przykład struktury zdalnego sterowania w węźle niskiego napięcia prosumenta (EM – licznik energii, ES – magazyn energii, PV – źródło energii, P, Q – moc czynna i bierna, E – energia, K – koszt)

- W zakresie sterowania lokalnego urządzeniami odbiorcy energii lub prosumenta przez dostosowanie algorytmów implementowanych w inwerterach OZE i magazynach energii do lokalnego sterowania węzłem prosumenta.
 - Zdalne wyłączanie źródeł lub ograniczanie generacji.
 - Możliwość sterowania prądem lub mocą niezależnie w każdej fazie. Niezależne w każdej fazie sterowanie mocą czynną (prądem) inwertera pozwala zwiększyć konsumpcją własną prosumenta. Może być również

wykorzystane przez OSD do sterowania rozpięciem mocy w sieci nn lub SN.

- Implementacja w inwerterach OZE i magazynów energii funkcji uzależniającej wartość mocy czynnej wprowadzanej przez inwerter do sieci od wartości napięcia w węźle jego przyłączenia $P = f(U)$, (np. jak przedstawiona na rysunku 2). Funkcja taka umożliwia ograniczenie liczby, bądź nawet eliminację, wyłączeń inwerterów przez zabezpieczenia nadnapięciowe w dni o dużym nasłonecznieniu. Efektem pozytywnym byłoby tu ograniczenie poziomu wahań napięć, przy względnie małym ograniczeniu ilości energii wprowadzonej przez źródło do sieci. [4].
- Implementacji możliwości pracy inwertera OZE lub magazynu energii w trybie regulacji napięcia albo mocy biernej albo współczynnika mocy. Ewentualnie implementacji funkcji uzależniającej wartość wprowadzanej do (pobieranej z) węzła sieci mocy biernej od wartości generowanej w danej chwili mocy czynnej $Q = f(P)$. Przykładowo, funkcja $Q = -P/\tan \psi$, gdzie ψ jest kątem impedancji zwarciowej widzianej z punktu przyłączenia źródła energii do sieci, umożliwia skompensowanie wzrostu napięcia w węźle sieci (składową podłużną) wynikającego z wprowadzenia do węzła mocy czynnej. [5]
- W zakresie sterowania zdalnego przez OSD. Realizacja różnych celów operatora, np. minimalizacja strat energii, symetryzacja prądów i napięć lub wartość i kierunek przepływu mocy (energii) w liniach i podsięciach, w transformatorach lub węzłach sieci, poprzez sterowanie rozpięciem mocy lub poziomami napięć niezależnie w każdej fazie. Potencjalne punkty realizacji sterowania oznaczone są liczbami od I do IV na rysunku 3. Przykładowo, sterowanie w pkt. I i III odnosić się może do symetryzacji rozpięciu odpowiednio w gałęzi nn i SN. Natomiast sterowanie w pkt. II i IV odnosić się może do symetryzacji rozpięciu mocy, odpowiednio w podsięci nn i podsięci SN. Sterowania te realizowane powinny być głównie inwerterami prosumentów (OZE i magazyny energii) i urządzeniami OSD (np. transformatory symetryzujące, OZE, magazyny energii), a w drugiej kolejności odbiorcami.

Podsumowanie

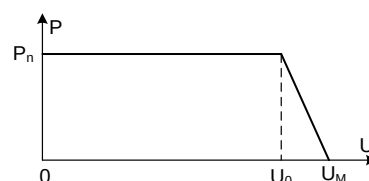
Podsumowując powyższe rozważania można stwierdzić, że w sieciach elektroenergetycznych wysokiego napięcia, tj. 400 kV, 220 kV i 110 kV zmiany będą miały charakter głównie strukturalny. Rozwój tych sieci będzie wynikał głównie z konieczności przesyłu mocy z północy na południe kraju. Funkcjonalnie, pełna obserwowalność jak i sterowalność tych sieci zostanie zachowana. Odpowiedzialność za pracę systemu, zapewniającą bezpieczeństwo energetyczne (bezpieczeństwo dostaw energii elektrycznej), pozostanie po stronie operatora systemu przesyłowego (lub jego odpowiednika).

Sieci średniego i niskiego napięcia strukturalnie ulegną również niewielkim zmianom. Spodziewać należy się pewnego wzrostu liczby fragmentów tych sieci pracujących z zamkniętymi pierścieniami oraz rozpowszechnienia się

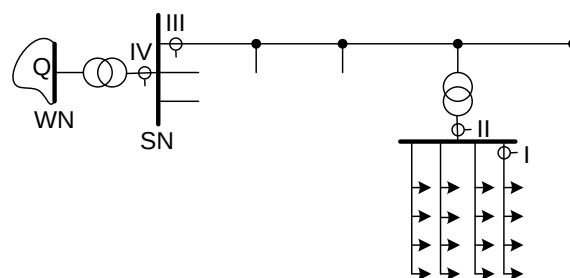
systemów rekonfiguracji sieci w przypadku wystąpienia zwarcia (FDIR). Aktywnemu sterowaniu podlegać będą źródła i magazyny energii jak i odbiory. Sterowanie realizowane będzie urządzeniami prosumentów jak i odbiorców energii.

W celu uzyskania efektywnego sterowania tymi urządzeniami w stosunkowo krótkim czasie operatorzy systemów dystrybucyjnych już obecnie powinni zmodyfikować wymagania dla przyłączanych urządzeń (źródeł energii i magazynów energii przyłączanych do sieci poprzez inwertery), a w tym wprowadzić wymóg:

- Stosowania tylko układów trójfazowych, co dotyczy źródeł, magazynów energii oraz zasilaczy chemicznych zasobników energii (np. hydrolizerów).
- Posiadania wbudowanych funkcji uzależniających wartość mocy wprowadzanej do sieci od napięcia w miejscu przyłączenia lub pozyskiwanego z innego węzła sieci, tj. $P = f(U)$, oraz od częstotliwości $P = g(f)$, z możliwością zdalnej konfiguracji nastawień.
- Zdolności pracy źródła i magazynu energii w trybie regulacji napięcia, mocy biernej lub współczynnika mocy, z możliwością zdalnej zmiany trybu pracy.
- Zdolności regulacji mocy wprowadzanej do sieci (a w przypadku magazynów energii również mocy pobieranej z sieci) niezależnie w każdej fazie.
- Zdolność zdalnej komunikacji przewodowej i/lub bezprzewodowej w zakresie modyfikacji parametrów wbudowanych funkcji oraz możliwości sterowania wartością mocy czynnej i biernej wprowadzanej do sieci elektroenergetycznej.



Rys. 2. Przykład postulowanej funkcji $P = f(U)$ inwertera źródła i magazynu energii



Rys. 3. Możliwości sterowania w sieci średniego i niskiego napięcia

Autor: prof. dr hab. inż. Zbigniew Lubosny, Politechnika Gdańska, Katedra Elektroenergetyki, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, E-mail: zbigniew.lubosny@pg.edu.pl

LITERATURA

- [1] Plan rozwoju w zakresie zaspokojenia obecnego i przyszłego zapotrzebowania na energię elektryczną na lata 2025-2034. PSE SA, Warszawa 2024.
- [2] Opinia Komitetu Elektrotechniki Polskiej Akademii Nauk w sprawie zrównoważonej transformacji energetycznej w polskiej elektroenergetyce. PAN Warszawa 2024.
- [3] Leferink R., Keyer C., Melentjev A.: Static Energy meter errors caused by conducted electromagnetic interference. IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, No 5(4): 49-55, December 2017.
- [4] Hanzelka Z., Piątek K.: Instalacje fotowoltaiczne w systemie elektroenergetycznym. PWN, Warszawa 2024.
- [5] Lubosny Z.: Farmy wiatrowe w systemie elektroenergetycznym. WNT Warszawa 2016, 2024.