

PRZYGRÓDZKI Maksymilian<sup>1</sup>

## Problematyka planowania rozwoju sieci przesyłowej jako zagadnienia transportowego

### WSTĘP

Powstanie i rozwój struktur systemu elektroenergetycznego wymagają prowadzenia procesu koordynacyjnego, którego zadaniem jest planowanie rozwoju sieci elektroenergetycznej. Realizacja tego procesu była i jest uwarunkowana bieżącymi możliwościami technicznymi i formalnymi wytycznymi. Nie można tutaj pominąć uwarunkowań zewnętrznych funkcjonowania energetyki. Do tych uwarunkowań można zaliczyć charakter gospodarki energetycznej kraju, który w obecnym okresie identyfikuje się z gospodarką rynkową. W szczególności potrzeba opracowywania długoterminowych planów rozwojowych wynika z następujących przyczyn:

- prawnych – ustawa Prawo energetyczne w art. 16 [12] oraz rozporządzenie „systemowe” [10] w art. 29 i art. 32 nakładają na przedsiębiorstwa energetyczne obowiązek sporządzania planów rozwoju oraz współpracy w zakresie sporządzania planów rozwoju sieci przesyłowej i koordynowanej sieci 110 kV;
- ekonomiczno-technicznych – brak koncepcji rozwoju sieci na większych obszarach może skutkować przyjęciem rozwiązań, które po kilku latach okazują się chybione inwestycyjnie lub też są rozwiązaniami o niewystarczającej pewności zasilania bądź też o wysokich kosztach eksploatacyjnych;
- organizacyjnych – tworzenia rynków lokalnych oraz transgranicznych.

Z powyższych przesłanek wynika, że konieczność prowadzenia procesu planowania rozwoju sieci jest niepodważalna. Z kolei z tej konieczności wynika potrzeba stosowania nowoczesnej, spójnej metodyki planowania rozwoju sieci elektroenergetycznej oraz odpowiednich narzędzi obliczeniowych.

Potrzeba ta musi uwzględniać zmianę podejścia do sieci i jej wykorzystania. W warunkach demonopolizacji elektroenergetyki i wdrożenia rynku energii podstawowym zadaniem procesu planowania rozwoju i modernizacji sieci staje się likwidacja ograniczeń zdolności przesyłowej. Brak swobody w zakresie realizacji transakcji handlowych jest przyczyną ograniczania konkurencji na rynku, a w konsekwencji – przyczyną zwiększenia kosztów zakupu energii elektrycznej przez odbiorców końcowych [2]. Likwidacja ograniczeń transportowych (przesyłowych) z jednej strony zmniejsza koszt generacji wymuszonej, jednak z drugiej strony wymaga przeprowadzenia inwestycji lub modernizacji obiektów sieciowych, powodujących zwiększenie kosztów infrastruktury sieciowej. Ponieważ koszt zakupu energii elektrycznej przez odbiorców końcowych składa się z dwóch podstawowych składników: kosztu energii elektrycznej i kosztu jej przesyłu, więc konieczne jest znalezienie uzasadnionego ekonomicznie poziomu inwestowania i rozwoju sieci, równoważącego przyrost nakładów z przyrostem efektów wynikających z likwidacji ograniczeń.

### 1 UWARUNKOWANIA PLANOWANIA ROZWOJU SIECI

Główne elementy procesu planowania rozwoju i modernizacji sieci powinny przede wszystkim uwzględniać:

- a) warunki rynkowe (przy spełnieniu wymogów środowiskowych), w których wskazane jest odwzorowanie struktury „podażowej” energii na rynku, wyróżniając rodzaj i konkurencyjność źródeł wytwórczych. Swoboda wyboru sprzedawcy na rynku energii oznacza, że szczególnym

<sup>1</sup>Dr hab. inż. M. Przygodzki, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, 44-100 Gliwice, ul. Bolesława Krzywoustego 2

- zainteresowaniem odbiorców cieszą się te źródła, które są efektywne rynkowo, tj. oferują energię elektryczną po akceptowalnej cenie;
- b) działania po stronie popytowej, tj. reakcję odbiorców w zakresie zmiany zapotrzebowania i wyboru sposobu pokrycia zapotrzebowania na energię;
  - c) odzwierciedlenie niepewności przyszłych uwarunkowań pracy sieci przesyłowej i sieci dystrybucyjnej poprzez wieloaspektowe podejście scenariuszowe, polegające na tworzeniu scenariuszy: popytu, podaży, wymiany międzyobszarowej oraz ich kombinacji;
  - d) kryteria ekonomiczne, pozwalające na wybór strategii optymalnych dla poszczególnych scenariuszy i badanych obszarów, a następnie strategii suboptymalnej (preferowanej), która będzie zawierać spójną ścieżkę rozwoju sieci.

Zmiana organizacji i zasad funkcjonowania elektroenergetyki po wejściu w życie w 1997 roku ustawy Prawo energetyczne [12] zobowiązuje podmioty pełniące obowiązki operatorów sieciowych do prowadzenia samodzielnej, w oderwaniu od zasad monopolistycznych, polityki rozwoju sieci. W tej sytuacji zadania związane z analizami przedsięwzięć rozwojowych, pokrywania kosztów inwestycji i ich opłacalność należą do operatorów właściwych danym obszarom sieci. Podejmowanie decyzji w warunkach samofinansowania stwarza potrzebę szczegółowego rozeznania konsekwencji ich przyjęcia, dlatego też istotny staje się zakres prowadzonych analiz.

Rozważając zadanie planowania rozwoju sieci elektroenergetycznej jako infrastruktury transportowej w świetle sprostania wyszczególnionym wymaganiom należy poczynić pewne założenia:

- analiza rozwojowa powinna być prowadzona jako wielowariantowa;
- analiza powinna obejmować wszystkie wymagane kryteria techniczne;
- z uwagi na stosunkowo długi horyzont okresu planowania do optymalizacji rozwoju powinno się wykorzystać metody optymalizacji dynamicznej;
- ze względu na dużą niepewność danych w procesie planowania rozwoju oraz w celu ograniczenia ryzyka podjęcia błędnych decyzji przy niespełnieniu założeń dotyczących uwarunkowań zewnętrznych, proces ten należy realizować w różnych scenariuszach;
- przy wielokryterialności zadania planowania podstawowym kryterium optymalizacji rozwoju powinien być rachunek ekonomiczny, w którym można uwzględnić poszczególne wymiary procesu. Odrzucenie analizy ekonomicznej, nawet w sytuacji nieustabilizowanej gospodarki, nie zmniejsza ryzyka popełnienia błędu w decyzjach inwestycyjnych.

Wymienione założenia powinny stanowić element metodyki planowania rozwoju sieci w nowych warunkach organizacyjno-rynkowych przy spełnieniu podstawowych celów strategicznych, dotyczących sprostania wymogom: ekonomiki działań (innowacyjności i konkurencyjności), uwarunkowań środowiskowych (ekologii) i bezpieczeństwa energetycznego [8]. Na tej podstawie można mówić o opracowaniu właściwych rankingów postępowania (ścieżek rozwojowych) i wskazaniu rozwiązań zalecanych.

## 2 METODYKA PLANOWANIA ROZWOJU SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ

Podstawowym zadaniem procesu planowania rozwoju sieci w warunkach rynkowych jest likwidacja zagrożeń związanych z niezawodnością pracy oraz ograniczeń zdolności transportowej (przesyłowej) sieci, przy spełnieniu kryteriów dotyczących długofalowego bezpieczeństwa elektroenergetycznego [1]. Likwidacja ograniczeń przesyłowych z jednej strony zmniejsza koszt generacji w systemie (dotyczy w szczególności sieci zamkniętej), a z drugiej strony wiąże się z przeprowadzeniem inwestycji lub modernizacji istniejących obiektów sieciowych (linii i stacji). Co istotne, likwidacja ograniczeń przesyłowych przynosi wymierne efekty odbiorcom i wytwórcom. Ważną kwestią jest zatem sformułowanie ekonomicznych miar jakości i skuteczności inwestowania w rozwój sieci [9].

W dotychczasowej, a często nadal stosowanej praktyce planowania modernizacji i rozwoju nie uwzględnia się w pełni ekonomiki pracy sieci i całego systemu, a jedynie związane z tym kryteria techniczne. Podejście takie jest częściowo słuszne i uzasadnione, ale nie nosi znamion optymalnego

wykorzystania możliwości istniejących struktur sieciowych. Potrzeba inwestycji jest więc obecnie efektem spełniania kryteriów technicznych, a kryterium wyboru są dostępne środki finansowe. Taka sytuacja prowadzi do wzmocnienia sieci w niektórych jej obszarach, gdzie wiedza jest pochodną doświadczeń planistów bądź jest konsekwencją prowadzonej polityki zarządczej.

Takie podejście nie jest jednak uzasadnione przy wdrożonych mechanizmach rynkowych. W gospodarce rynkowej oczekiwane jest bowiem pełne wykorzystywanie możliwości sieci, przy stosowaniu odpowiednich procedur planistycznych [1, 2, 9]. Niedopasowanie procesu planowania do realnych mechanizmów rynkowych niesie ze sobą wzrost kosztów infrastruktury sieciowej i funkcjonowania systemu oraz brak reakcji na sygnały o istniejących (i powstających) ograniczeniach.

Realizacja postawionego celu wymaga zastosowania odpowiednich metod funkcjonalnych. Metody dostępne w literaturze mogą być klasyfikowane według różnych kryteriów, m.in. z uwagi na: stosowane podejście (deterministyczne, Backcasting, Real Option Approach), uwarunkowania funkcjonowania systemu (monopolistyczne i zdecentralizowane) czy odwzorowanie osi czasu (statyczne i dynamiczne). Możliwa jest również klasyfikacja metod z uwagi na stosowane techniki obliczeniowe. W takim układzie wśród metod planowania rozwoju i modernizacji sieci można wyróżnić trzy podstawowe grupy [6]:

- I. metody optymalizacji matematycznej,
- II. metody heurystyczne,
- III. metody metaheurystyczne.

W grupie metod optymalizacji matematycznej poszukuje się optymalnego planu rozwoju sieci z wykorzystaniem procedury obliczeniowej rozwiązującej sformułowane zadanie matematyczne. Do rozwiązania zadania optymalizacji stosuje się m.in.: metody programowania liniowego i nieliniowego, metody programowania dynamicznego, metody dekompozycji hierarchicznej oraz metody mieszane. Metody mieszane pozwalają na połączenie pozostałych metod, gdzie przykładowo do optymalizacji pojedynczego stanu można wykorzystać programowanie liniowe, sformułowania ścieżki rozwoju pomiędzy stanami – programowanie dynamiczne, a w zakresie uwzględnianych wskaźników – hierarchizację wyników.

W metodach optymalizacji matematycznej poszukuje się ekstremum założonej funkcji celu, z uwzględnieniem ograniczeń nałożonych na rozwiązania dopuszczalne. Ograniczenia uwzględniane w procesie optymalizacji powinny prawidłowo odwzorowywać uwarunkowania wynikające ze stawianych celów strategicznych:

- techniczne, w tym związane z zapewnieniem bezpieczeństwa dostaw energii elektrycznej odbiorcom końcowym;
- ekonomiczne, obejmujące koszty inwestycyjne i operacyjne;
- środowiskowe, dotyczące wzajemnych oddziaływań między infrastrukturą elektroenergetyczną a środowiskiem naturalnym.

Ponieważ w procesie poszukiwania ekstremum funkcji celu, w szczególności przy uwzględnieniu rozległości planowanych sieci, nie jest możliwe dokładne odwzorowanie wszystkich ograniczeń, często wprowadza się uproszczenia. Uproszczenia te, niekiedy daleko idące, według publikacji przeglądowej [5] polegają głównie na:

- pominięciu strat mocy (stosuje się np. stałoprądowy model sieci do wyznaczania rozptywu mocy),
- nieuwzględnianiu w funkcji celu kosztów operacyjnych oraz kosztów związanych z zapewnieniem niezawodności dostaw i jakości energii elektrycznej (zwykle koszty te są wyznaczone dopiero po wykonaniu optymalizacji rozwoju sieci),
- pominięciu zmiany zapotrzebowania w kolejnych latach okresu planowania,
- nieuwzględnianiu harmonogramów pracy elektrowni wodnych,
- pominięciu możliwości jednoczesnego wyłączenia więcej niż jednego elementu systemu elektroenergetycznego (stosowane jest tzw. kryterium n-1),

- nieuwzględnianiu czynników ryzyka, jakie niesie ze sobą trwający proces przekształceń w sektorze elektroenergetycznym,
- pomijaniu w modelach planowania aspektów związanych z momentem wprowadzenia do eksploatacji nowych elementów sieci, tj. model pozwala jedynie określić, „gdzie” w systemie dany element powinien być wprowadzony, natomiast nie pozwala na określenie, „kiedy” ma to nastąpić (optymalizacja statyczna),
- założeniu, że koszt jednostkowy niedostarczonej energii nie zależy od czasu trwania przerwy oraz ilości niedostarczonej energii, często nawet jest przyjmowana jednakowa wartość kosztu niedostarczonej energii we wszystkich węzłach analizowanego systemu,
- nieuwzględnianiu w procesie planowania opcji alternatywnych, polegających na możliwości modernizacji istniejących elementów sieci, które pozwoliłyby na zwiększenie ich zdolności przesyłowych (rozpatruje się jedynie budowę nowych elementów sieci).

Metody heurystyczne polegają na przeszukiwaniu wygenerowanych, zgodnie z przyjętą logiką, stanów opisujących możliwy rozwój sieci. Proces przeszukiwania odbywa się do momentu, aż algorytm stosowany do generacji nowych stanów sieci nie będzie zdolny do wygenerowania lepszego od już znalezionej konfiguracji opisującego możliwy rozwój sieci. Przy ocenie wygenerowanych stanów sieci są uwzględniane kryteria przystosowania danego stanu. Kryteria te mogą obejmować: koszt inwestycyjny i operacyjny związany z danym stanem, możliwość zaistnienia ograniczeń sieciowych lub przeciążeń poszczególnych elementów sieci, ilość niedostarczonej energii odbiorcom końcowym itp. Jedną z metod heurystycznych stosowanych w planowaniu rozwoju systemu jest zadanie wprowadzenia „sieci przyległej” [6]. Inną metodą jest zbudowanie sieci na podstawie eliminacji gałęzi niedociążonych. Również do metod heurystycznych należy analiza czułości, w której są badane przyrostowo obciążenia gałęzi w celu wyznaczenia obwodów wymagających wzmocnienia [5]. Metody heurystyczne są uznawane za stosunkowo atrakcyjne w zastosowaniu do planowania rozwoju i modernizacji sieci przesyłowej z uwagi na to, że przy niewielkim nakładzie obliczeń pozwalają znaleźć rozwiązanie spełniające założone ograniczenia. Główną wadą tych metod jest to, że nie gwarantują znalezienia rozwiązania suboptymalnego. Metody heurystyczne mogą w procesie poszukiwania osiągnąć minimum lokalne, co wykorzystuje się często do znalezienia rozwiązania przybliżonego, które jest punktem startu dla metod optymalizacji matematycznej.

Trzecią grupą metod pozwalających na rozwiązanie zadania planowania rozwoju systemu są metody metaheurystyczne. Metody te łączą własności metod optymalizacyjnych i heurystycznych. Dają one wysokiej jakości rozwiązania dla rozległych systemów przy krótkim czasie obliczeń. Do grupy tej można zakwalifikować metody szczególnie rozwijane w ostatnim czasie, wykorzystujące m.in. algorytmy genetyczne (GA), metodę symulowanego wyżarzania (SA) czy wyszukiwania tabu (TS). Algorytmy genetyczne są inicjowane dla zbioru punktów startowych obliczeń, podczas gdy algorytmy wyszukiwania tabu lub symulowanego wyżarzania rozpoczynają działanie w pojedynczym punkcie startu. Dlatego też algorytmy genetyczne mają właściwości rozwiązywania zadań wielokryterialnych. Innymi metaheurystycznymi metodami są systemy ekspertowe, metody logiki rozmytej, teorii gier, czy też, w ramach metod adaptacyjnych, tzw. zachłannej adaptacyjnej procedury poszukiwań losowych (GRASP).

### 3 FUNKCJA CELU PROCESU PLANOWANIA ROZWOJU SIECI

Kluczowym czynnikiem w metodyce planowania rozwoju sieci jest przyjęcie odpowiedniej funkcji celu. W pracy [11] analizuje się następujące funkcje celu w planowaniu inwestycji sieciowych w warunkach rynkowych:

- maksymalizację tzw. dobrobytu społecznego (ang. Social Welfare), określanego również jako nadwyżka rynkowa (ang. Market Surplus lub Socio-Economic Surplus),
- maksymalizację nadwyżki producenta (ang. Producer Surplus),
- maksymalizację nadwyżki konsumenta (ang. Consumer Surplus),
- minimalizację tzw. lokalnej siły rynkowej (ang. Local Market Power).



W pracy [11], na podstawie wyników analiz przeprowadzonych na prostych przykładach, stwierdzono, że przyjęcie różnych funkcji celu może prowadzić do odmiennych decyzji inwestycyjnych. Stwierdza się również, że – z punktu widzenia efektywności ekonomicznej całego procesu planowania – wspólnym kryterium oceny wszelkich działań cząstkowych prowadzonych w ramach tego procesu powinien być ich wpływ na wartość dobrobytu społecznego. Przyjęcie maksymalizacji dobrobytu społecznego jako funkcji celu pozwala na wypełnienie powyżej sformułowanego głównego celu planowania rozwoju w warunkach rynkowych [9].

Rozpatrując planowanie rozwoju w warunkach rynkowych (zdecentralizowanych), należy podkreślić dużą dynamikę problemu. Dynamika ta jest związana z przyszłościowym charakterem zadania, funkcjonowaniem gospodarki rynkowej i zjawiskami towarzyszącymi, w tym ze zmiennością kreowaną przez rynki finansowe. Wynikające stąd niepewność co do przyszłych stanów oraz ryzyko, przy znajomości rozkładu badanych czynników, są ważnymi elementami procesu planowania. Praktyka wskazuje podział na zdeterminowane i losowe czynniki, które są uwzględniane na różnych etapach planowania [7]. Czynniki o charakterze zdeterminowanym tworzą scenariusze, a więc określone zbiory warunków brzegowych. Natomiast czynniki o charakterze losowym są wprowadzane na etapie decyzji, tj. w obrębie scenariuszy. Po zidentyfikowaniu optymalnego rozwiązania dla każdego scenariusza krokiem ostatecznym jest wybór rozwiązania optymalnego dla wszystkich możliwych scenariuszy. W tej perspektywie stosowane metody można podzielić na grupy:

- a) uwzględniające scenariusz najbardziej prawdopodobny lub „scenariusz odniesienia” i wprowadzające odpowiednie „marginesy bezpieczeństwa” dla skompensowania oczekiwanych skutków niepewności. Jest to rozwiązanie deterministyczne, jednokryterialne (oparte z reguły na minimalizacji kosztów);
- b) uwzględniające warunki niepewności explicite, zgodnie z zasadami probabilistyki, stosując kryterium polegające na minimalizacji wartości oczekiwanej kosztów przy rozpatrywaniu wielu scenariuszy z wykorzystaniem techniki Monte Carlo;
- c) wykorzystujące tzw. macierz wypłat dla różnych scenariuszy i możliwych realizacji, w kategorii gry z „naturą”.

Ocena prawdopodobieństwa realizacji scenariuszy nie jest jedynym podejściem do określenia oczekiwanej wartości przewidywanych przedsięwzięć. Kryterium wartości oczekiwanej (zakładające, że planem najlepszym jest ten, który zapewnia maksymalizację oczekiwanych efektów rozbudowy sieci dla wszystkich scenariuszy) może jednak zniekształcić wynik. Wynika to np. z faktu, iż niektóre zjawiska, charakterystyczne dla rynku otwartego (konkurencyjnego), są zjawiskami „o niskiej częstości występowania”. Tak dzieje się w przypadku, gdy jeden ze scenariuszy dominuje w całym okresie planistycznym. Wówczas możliwe jest wprowadzenie innych kryteriów, uwzględniających zabezpieczenie przed ryzykiem. Model „analizy ryzyka” lub „wrażliwości” wskazuje, że rozwiązaniem preferowanym jest takie, które minimalizuje „uczucie żalu” ze strony decydenta po stwierdzeniu ex post, że przyjęte rozwiązanie nie było optymalne. Podejście takie wskazuje, że najlepszy wybór polega na ograniczeniu szkód w przypadku zrealizowania najgorszego scenariusza.

Wśród metod dotyczących systemów o cechach zdecentralizowanych można również znaleźć zalecenia, dotyczące wykorzystania węzłowych cen krańcowych (ang. *Locational Marginal Prices*) w procesie planowania oraz w bieżącym przygotowaniu i pracy systemu elektroenergetycznego [1, 5]. Obserwuje się zmiany procedury planowania z podejścia klasycznego, opartego tylko na kryteriach techniczno-ekonomicznych, w kierunku nowego podejścia. Nowy proces planowania zostaje oparty na analizie mechanizmów rynkowych, w celu identyfikacji potrzeb rozwojowych systemu oraz harmonogramowania inwestycji, w tym spełniania ograniczeń rynkowych, technicznych i środowiskowych [9]. Możliwość wykorzystania zadania optymalizacji rozptywu mocy (ang. *Security Constrained Optimal Power Flow*) i symulatora rynku energii do planowania rozwoju została dostrzeżona i wykorzystana w różnych krajach i przedsiębiorstwach przesyłowych (USA, Włochy, Hiszpania, Skandynawia) [3]. Zalecenia te znalazły praktyczny wymiar również w badaniach i propozycjach rozwiązań krajowych, dotyczących metodyki planowania rozwoju sieci zamkniętej [1, 2, 9].

#### 4 NARZĘDZIA OBLICZENIOWE WSPOMAGAJĄCE REALIZACJĘ ZADANIA PLANOWANIA

Komercyjne oprogramowanie analityczne, wykorzystywane na potrzeby sektora elektroenergetycznego, z reguły cechuje się dużą elastycznością z punktu widzenia możliwych jego zastosowań. To samo oprogramowanie, poza firmą doradcą, może być z powodzeniem wykorzystywane przez grupy energetyczne, przedsiębiorstwa wytwórcze, przedsiębiorstwa sieciowe, firmy zajmujące się obrotem energią elektryczną, inwestorów planujących inwestycje lub akwizycje w tym sektorze [3]. Zagadnienia związane z perspektywami rozwojowymi sektora elektroenergetycznego dla wszystkich z tych przedsiębiorstw mają duże znaczenie, gdyż wyniki analiz mogą być wykorzystywane do podejmowania decyzji potencjalnie związanych z zaangażowaniem dużych środków kapitałowych. Inną grupę użytkowników tych narzędzi stanowią urzędy regulacyjne oraz wykonawcza administracja państwowa. Ta grupa z kolei jest zainteresowana m.in. badaniem skutków wpływu zróżnicowanych czynników zewnętrznych na dalsze funkcjonowanie sektora oraz siły rynkowej poszczególnych przedsiębiorstw elektroenergetycznych.

Można stwierdzić, że w dużej mierze zastosowanie danego narzędzia analitycznego zależy od sposobu skonfigurowania przypadku obliczeniowego [4]. Dla potrzeb przedsiębiorstwa sieciowego ceną właściwością jest możliwość odwzorowania sieci przesyłowej. Może to być wykonane w podobny sposób, jak przy obliczeniach rozplływowych (stało- lub zmiennoprądowych) lub w sposób uproszczony, poprzez zdefiniowanie obszarów rynkowych oraz powiązań sieciowych pomiędzy nimi (nie odwzorowuje to jednak rzeczywistej sieci i jej wpływu na funkcjonowanie systemu elektroenergetycznego). Dodatkowym, istotnym elementem dla potrzeb analiz sieciowych jest określanie kosztów krańcowych energii elektrycznej w węzłach sieci przesyłowej lub dla obszarów rynkowych. Umożliwia to dokonanie przejścia do określenia taryf przesyłowych w węzłach sieci lub dla obszarów rynkowych, a także w przypadku bardziej zaawansowanych rynków energii elektrycznej, stosownie pochodnych instrumentów rynkowych (np. praw do uzyskania dochodu przy ograniczeniach przesyłowych – CRR lub finansowych praw do przesyłu – FTR).

Ważnym elementem - z analitycznego punktu widzenia - jest również sposób odwzorowania podsystemu wytwarzania energii elektrycznej, który powinien być dostosowany do jego lokalnej specyfiki, co w polskim przypadku oznacza przede wszystkim precyzyjne odwzorowanie pracy źródeł ciepłych konwencjonalnych. Spośród źródeł odnawialnych, największe znaczenie ma odwzorowanie źródeł wiatrowych.

Przy interpretacji wyników obliczeń ważne jest, aby narzędzie było wyposażone w zaawansowany interfejs graficzny użytkownika (GUI), ułatwiający interpretację tych wyników w postaci wizualnej (np. map gęstości). Ma to duże znaczenie, szczególnie w przypadku wielowariantowych obliczeń sieciowych.

Większość ze stosowanych narzędzi obliczeniowych (można je uznać jako narzędzia o zakresie sektorowym), stosunkowo długo obecne są już na rynku komercyjnym [4]. Powstały więc one jeszcze przed rozpoczęciem deregulacji sektora elektroenergetycznego. Odpowiadały wówczas na potrzeby stawiane narzędziom analitycznym dla dużych, zintegrowanych pionowo przedsiębiorstw elektroenergetycznych. Potrzeby analityczne tych przedsiębiorstw kładły głównie nacisk na analizy planistyczne, dotyczące podsystemu wytwarzania energii elektrycznej i jego rozbudowy. Było to głównie motywowane tym, że największa część kosztów związanych z łańcuchem wartości energii elektrycznej jest zlokalizowana właśnie w tym podsystemie. Z czasem wobec rosnącego zainteresowania zrównoważonym rozwojem, coraz większe zainteresowanie dotyczyło tematyki ekologicznej, co spowodowało ewolucję tych narzędzi właśnie w tym kierunku.

Stopniowa deregulacja oraz kształtowanie się coraz bardziej konkurencyjnych rynków energii elektrycznej, wywołały potrzebę wykonywania analiz dotyczących określania perspektyw lokowania energii elektrycznej, wytworzonej przez producentów na rynku oraz określania wartości aktywów wytwórczych.

Kolejnym impulsem do dostosowywania narzędzi o charakterze ekonomiczno-rynkowym do bieżących potrzeb analitycznych, była ekspansja energetyki odnawialnej i jej integracja z systemem

elektroenergetycznym. Przy tej okazji, szczególnie uwydatniły się problemy związane z nie nadążaniem rozwoju sieci przesyłowej za potrzebami przyłączeniowymi źródeł wytwórczych, a zwłaszcza źródeł wiatrowych. Coraz większego znaczenia zaczęło nabierać określenie kosztów ponoszonych przez operatorów sieciowych związane z przyłączaniem tych źródeł, a także kosztów społecznych ich rozwoju [9].

Wobec ograniczonej przewidywalności pracy dynamicznie rozwijanych źródeł wiatrowych, dotychczasowe sposoby uwzględniania niepewności w długich horyzontach czasowych w postaci scenariuszy, okazują się niewystarczające. Stale wzrasta znaczenie metod probabilistycznych w odwzorowywaniu pracy tych źródeł, co ma już odbicie w stosowanych algorytmach obliczeniowych.

Poniżej przedstawiono wybrane aspekty komputerowych narzędzi analitycznych stosowanych w planowaniu rozwoju sieci [4].

#### 4.1 Miejsce i rola sieci przesyłowej

System przesyłowy służy do transportu energii elektrycznej od punktów wytwarzania (elektrownie zawodowe) do miejsc konsumpcji (centrów odbioru). System ten nie został zaprojektowany do świadczenia uczestnikom rynku energii elektrycznej usług w zakresie przesyłu, przez co w okresie deregulacji i spontanicznego rozwoju źródeł odnawialnych, coraz bardziej traci swoje możliwości optymalnego rozwoju.

Budowa nowych połączeń transportowych w postaci linii oraz nowych stacji elektroenergetycznych jest w coraz większym stopniu podyktowana doraźnymi potrzebami przyłączeniowymi, a nie koniecznością budowy sieci szkieletowej, zoptymalizowanej pod kątem niezawodności oraz pod kątem np. minimalizacji strat przesyłowych. Z tego względu obserwuje się proces kurczenia obszaru optymalizacji rozwoju sieci przesyłowej nawet w długim okresie czasowym oraz mniejsze zapotrzebowanie na narzędzia analityczne optymalizujące ten rozwój. Skutkiem tego zwiększa się pole dla analiz planistycznych z wykorzystaniem narzędzi o charakterze symulacyjnym.

Narzędzia tej grupy wykorzystując zdefiniowaną konfigurację sieci przesyłowej i zdeterminowany skład źródeł wytwórczych, są w stanie w sposób chronologiczny (np. cały rok godzina po godzinie) odwzorować relacje techniczne pomiędzy obszarami i ich skutki rynkowo-ekonomiczne. Stąd, uwzględnia się między innymi wskaźniki (ceny) węzłowe, co w niektórych przypadkach mylnie jest przypisywane wyłączenie obszarom rynkowym. Prawidłowe określenie wartości tych cen wymaga określenia składników kosztowych związanych z: produkcją energii elektrycznej, kosztami ograniczeń przesyłowych oraz kosztami strat. Daje to impuls z jednej strony do taryfowania uczestników rynku energii elektrycznej zgodnie z ich rzeczywistą rolą w systemie elektroenergetycznym, z drugiej zaś strony, daje prawidłowe sygnały o rozbudowie bazy wytwórczej oparte na kryteriach rynkowych [1, 2, 9].

Przypisanie tych sygnałów konkretnym lokalizacjom (węzłom) ma - poza wspomnianym powyżej celem indykatywnym - charakter poznawczy, wskazując rozkład, lokalizację, przyczyny i wartość powstawania kosztów ograniczeń. Redukcja tych kosztów powinna być zasadniczym elementem procesu planowania w warunkach rynkowych.

#### 4.2 Optymalizacja rozptywu mocy

Ważnym elementem analiz rynkowych w zakresie systemu przesyłowego, jest określanie rozdziału obciążeń jednostek wytwórczych energii elektrycznej przy uwzględnieniu uwarunkowań sieciowych metodą optymalnego rozptywu mocy (OPF). Metoda OPF pozwala na jak najlepsze (optymalne) wykorzystanie istniejących zdolności przesyłowych w analizowanym systemie elektroenergetycznym. Uzyskane rozwiązanie spełnia przy tym narzucone ograniczenia, wynikające często ze względów technicznych, a także handlowych. Przede wszystkim zaś wyznaczone w ramach obliczeń, rozwiązanie spełnia sformułowaną w zadaniu optymalizacyjnym funkcję celu [9]. Funkcja ta zwykle jest związana z kosztami działania systemu elektroenergetycznego, a więc kosztami wytwarzania, przesyłu i dystrybucji. Minimalizacja tej funkcji, spełnia więc postawione przed operatorem systemu przesyłowego, statutowe zadanie świadczenia usługi przesyłu energii elektrycznej w sposób

bezpieczny i po możliwie najniższych kosztach. Zbieżność tego zadania z zasadą realizacji OPF w pełni uzasadnia wykorzystanie tej funkcji w ramach planowania rozwoju.

Wykorzystanie metody OPF w wyznaczaniu przyszłych stanów systemu elektroenergetycznego, w tym w określaniu wykorzystania jednostek wytwórczych, ma podstawowe znaczenie. Waga tego problemu wynika stąd, iż sposób wykorzystania (obciążania się) sieci przesyłowej wyznacza potrzeby rozwojowe. Metoda OPF jest zatem rozwinięciem metody rynkowego rozdziału obciążeń na jednostki wytwórcze o uwzględnienie ograniczeń sieciowych [2].

Uwzględniając powyższe spostrzeżenia należy zauważyć, że szczególnego znaczenia dla potrzeb planowania rozwoju nabierają zatem te narzędzia analityczne, które posiadają w swoich funkcjach możliwość określenia optymalnego rozptyłu mocy zarówno w stanach pracy ustalonej, jak i w stanach awaryjnych (np. n-1 czy n-2). Niestety tylko część narzędzi analitycznych posiada takie możliwości. Tym samym wpływa to na zakres zastosowań i sposób jakości wykorzystania w pracach analitycznych na potrzeby operatora systemu przesyłowego.

### 4.3 Odwzorowanie sieci

Podniesiony w poprzednim punkcie, problem uwzględniania sieci – będącej przedmiotem badań – w analizach rozwojowych sieci, jest kluczowym elementem całego procesu planowania. Należy również zauważyć, że czasem ze względów historycznych (pierwotne przeznaczenie opracowanego narzędzia), czasem aplikacyjnych (brak wystarczających możliwości obliczeniowych) stosowane programy komputerowe mają ograniczone możliwości odwzorowania sieci przesyłowej w obliczeniach, co wydaje się niespójne z postawionym zadaniem planistycznym.

Kwestia ta została w niektórych programach rozwiązana połowicznie, tj. wprowadzono uproszczoną sieć, która określa jedynie wybrane połączenia, dotyczące zwykle powiązań pomiędzy obszarami systemu elektroenergetycznego (zwanymi czasem też obszarami rynkowymi). W tym przypadku nie występuje rzeczywista reprezentacja sieci, a jedynie jej namiastka, w której parametry techniczne ograniczone zostają do określenia dopuszczalnej zdolności transportowej. W takim układzie nie można mówić o rozwiązaniu w kategorii OPF, a jedynie o uzyskiwaniu rozwiązania na miarę uproszczonego układu połączeń, bez możliwości znalezienia jego odpowiednika w systemie rzeczywistym. Nie spełnia to zatem postulatów zadania rozwoju sieci przesyłowej.

Właściciele oprogramowania (często również jego autorzy), dostrzegli nakreślony powyżej problem oraz jego wagę w obecnych strukturach organizacyjnych funkcjonowania elektroenergetyki, gdzie rozdzieleniu uległa działalność przesyłowa (operatorska) i wytwórcza (oraz handlowa). W związku z tym zaproponowano kolejną wersję modyfikacyjną narzędzi obliczeniowych. W niektórych programach dodano interfejsy, które umożliwiają wyprowadzenie uzyskanych wyników optymalizacji rozdziału obciążeń na jednostki wytwórcze (bez sieci) i użycie ich jako wielkości wejściowych do innych (zewnętrznych) aplikacji, posiadających możliwość realizacji obliczeń z wykorzystaniem technicznych parametrów fizycznej sieci elektroenergetycznej. Rozwiązanie to pozwala na zweryfikowanie zadania uzyskania najlepszego (z uwagi na funkcję celu) wyniku przy zweryfikowaniu ograniczeń sieciowych.

Należy jednak podkreślić, że uzyskany w tym przypadku rozdział procesu obliczeniowego na etap „bez sieci” oraz „z siecią” daje w wyniku wzmocnienie połączeń wymuszone układem jednostek wytwórczych (minimalizacją kosztów wytwarzania), nie dając możliwości pełnego wykorzystania istniejącej infrastruktury. Zmusza to operatora do rozwijania połączeń względem istniejących tanich jednostek i zwiększa dysproporcje rozwoju systemu elektroenergetycznego (obszary generacyjne i odbiorcze) nadwyrażając zasady równomiernego rozwoju i bezpieczeństwa pokrycia zapotrzebowania.

### WNIOSKI

Sieć przesyłowa jest strukturą przestrzenną pełniącą funkcje transportowe energii elektrycznej zarządzaną przez operatorów sieciowych. Planowanie rozwoju tej sieci jest zadaniem wzmocnienia zdolności transportowej. Nowe uwarunkowania funkcjonowania systemu elektroenergetycznego, w tym postępujące urynkowanie, wymagają od operatorów systemów przesyłowych zmiany



podejścia do procesu długoterminowego planowania rozwoju sieci przesyłowej. W nowym podejściu proces ten nie powinien być utożsamiany wyłącznie z wymiarem technicznym, ale w pierwszej kolejności powinien bazować na zagadnieniach ekonomiczno-rynkowych. Zmiana zakresu analiz planistycznych wymaga korekt metodycznych oraz pozyskania i implementacji stosownych narzędzi obliczeniowych. Wykorzystanie tych narzędzi nie może być ograniczone tylko do analiz w ramach opracowywania planów rozwoju systemu, ale również do analiz o charakterze strategicznym, w tym do analiz relacji popytowo-podażowych i oddziaływań rynkowych. Są to nowe właściwości komputerowych narzędzi obliczeniowych, wspomagających proces planowania rozwoju sieci przesyłowej.

### **Streszczenie**

*Sieci elektroenergetyczne służą do transportu energii elektrycznej. Transport ten odbywa się od źródeł energii (elektrowni) do miejsc konsumpcji (odbiorców) przy uwzględnieniu technicznych uwarunkowań funkcjonowania sieci i całego systemu elektroenergetycznego. Rozwój sieci jest zatem rozwojem infrastruktury transportowej. Na rozwój bezpośredni wpływ ma spełnienie ograniczeń technicznych jak również uwzględnienie warunków zewnętrznych (demograficznych, gospodarczych, środowiskowych) wpływających na funkcjonowanie elektroenergetyki.*

*W artykule przedstawiono bieżące uwarunkowania rozwoju sieci przesyłowej wynikające w szczególności z rynkowego charakteru funkcjonowania sektora elektroenergetycznego. Na podstawie wyszczególnionych uwarunkowań określono zasadnicze elementy prowadzenia analiz rozwojowych. Przedstawione zostały również elementy metodyczne, w tym sposoby poszukiwania rozwiązania analitycznego. Rozwiązanie to określone jest przy zdefiniowanej funkcji celu. W artykule przedstawiono ogólne zalecenia związane ze sformułowaniem funkcji celu w przypadku poszukiwania rozwiązań w warunkach rynkowych. Prezentowane rozważania powiązane również z opisem cech funkcjonalnych spotykanych na rynku wśród narzędzi obliczeniowych. Wyróżniono w tym zakresie podstawowe oczekiwane aspekty analityczne związane z realizacją celów zadania planowania rozwoju. W ten sposób powiązano zarówno metodykę jak i praktyki rozwiązywania zadania planowania rozwoju sieci przesyłowej.*

## The problem of the transmission network development planning as a transportation issue

### **Abstract**

*Power networks are used to transport electricity. This transport takes place from energy sources (power stations) to the places of consumption (loads) taking into account the technical conditions of operation of the network and the whole power system. Development of the power network is therefore the development of transport infrastructure. The development of the direct impact is the fulfillment of technical limitations as well as the inclusion of external conditions (ie. demographic, economic, environmental) affecting the operation of the power sector.*

*The article presents the current conditions of development of the transmission network resulting in particular from the market character of the functioning of the power sector. On the basis of specified conditions set out the essential elements to conduct research and development. It also includes elements of the methodology, including the search for the analytical solution. This solution is determined by the function to be defined. The article presents general recommendations relating to the formulation of the objective function for searching solutions in market conditions. Presented considerations also been linked to a description of a functional computational tools. Distinguished in this respect the fundamental aspects of the analytical expected related to the implementation of the objectives of development planning tasks. In this way implicated in both methodology and practice of solving the problem of planning the development of the transmission network.*

### **BIBLIOGRAFIA**

1. Kocot H., Analiza i synteza rozwoju systemu elektroenergetycznego z wykorzystaniem kosztów krańcowych, Gliwice 2012.
2. Korab R., Optymalizacja operatorstwa przesyłowego w krajowym systemie elektroenergetycznym, Gliwice 2011.

3. Kwiatkowski M.: Modele rynkowe i ich zastosowanie w sektorze elektro-energetycznym. Rynek Energii nr 4/2010
4. Kwiatkowski M., Przygodzki M.: Analysis of Tools Supporting the TransmissionGrid Development Planning in Market Conditions. ActaEnergetica nr 2/2014
5. Latorre G., Cruz R. D., Areiza J. M., Villegas A.: Classification of Publications and Models on Transmission Expansion Planning. IEEE Trans. on Power Systems Vol. 18 No. 2, May 2003.
6. OloomiBuygi M.: Transmission Expansion Planning in Deregulated Power Systems. PhD Thesis Dissertation. Darmstadt University of Technology, Darmstadt 2004.
7. Paulun T., Haubrich H. J., Boxberger M.: Calculating Optimal Network Expansion Strategies under Uncertain Boundary Conditions with Regard to Economic and Non-Economic Criteria. Paper No. C1-105. CIGRE, Paris 2008.
8. Popczyk J.: Bezpieczeństwo elektroenergetyczne w społeczeństwie postprzemysłowym na przykładzie Polski. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2009.
9. Przygodzki M.: Modelowanie rozwoju sieci elektroenergetycznej współpracującej ze źródłami rozproszonymi, Gliwice 2011.
10. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 roku w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego. Dz.U. nr 93, poz. 623 z roku 2007 (z późniejszymi zmianami).
11. Sauma E. E., Oren S. S.: Economic Criteria for Planning Transmission Investment in Restructured Electricity Markets. IEEE Trans. on Power Systems Vol. 22 No. 4, November 2007.
12. Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. Prawo energetyczne. Dz.U. nr 153, poz. 1504 (z późniejszymi zmianami).