



# MAKSYMALIZACJA VS OPTIMALIZACJA WYKORZYSTANIA ELEKTROENERGETYCZNYCH SIECI ROZDZIELCZYCH O STRUKTURZE PROMIENIOWEJ

prof. dr hab. inż. Zbigniew Lubośny / Politechnika Gdańska

## 1. WSTĘP

Rozwój systemów elektroenergetycznych jest uwarunkowany istotnym, jeżeli nie masowym, przyrostem liczby źródeł energii elektrycznej różnego typu, tzw. generacji rozproszonej, przyłączanych do sieci elektroenergetycznych. Przyłączenia te realizowane są do sieci wysokiego napięcia (WN), średniego napięcia (SN), jak i niskiego napięcia (nN). Do sieci WN przyłączane są (i będą) głównie duże farmy wiatrowe oraz większe elektrownie gazowe, biogazowe, biomasowe. Do sieci SN przyłączane są (i będą) mniejsze, w sensie mocy znamionowej, elektrownie typów wymienionych powyżej. Natomiast w sieciach nN można się spodziewać głównie mikroelektrowni domowych i przydomowych, wśród których wyróżnić można elektrownie wiatrowe, fotowoltaiczne oraz ciepłe, bazujące na typowych paliwach, jak węgiel, gaz czy paliwa ciekłe.

W przeszłości systemy elektroenergetyczne rozwijały się w kierunku systemów, w których odporność na zmianę stanu pracy odbiorów, tj. wartości mocy przez nie pobieranej, była jednym z podstawowych wymogów. Stan taki praktycznie nadal ma miejsce.

Równocześnie wymagano, i wymaga się nadal, aby zmiana konfiguracji sieci, do której są przyłączone odbiory, rozumiana jako wyłączenie jednego elementu systemu (a w niektórych przypadkach dwóch elementów systemu), również nie prowadziła do przeciążenia pozostałych elementów sieci ani do odchylenia się napięć poza zakres dopuszczalny.

Powyższe skutkuje tym, że sieci takie (współczesne) pracują z dużym zapasem zdolności przesyłowych. Zapas zdolności przesyłowych należy rozumieć tu w kontekście długookresowym, tj. w czasie nie krótszym niż doba, a praktycznie na przestrzeni roku lub dłuższym. W krótkim okresie czasu, np. w szczycie obciążenia, może się bowiem zdarzyć, że zdolności przesyłowe danej sieci lub jej części (elementów) są znacząco (lub w pełni) wykorzystane.

Sieci elektroenergetyczne, funkcjonujące w sposób jak opisany powyżej, tworzone były i są na podstawie zasady, którą można nazwać *przyłącz i zapomnij*. Oznacza to, że do sieci takiej przyłączane są odbiory, których praca w dowolnej chwili czasu, w stanach normalnych, nie może spowodować przekroczenia obciążenia dopuszczalnego elementów tej sieci.

Rozwój tzw. generacji rozproszonej wiąże się z przyłączaniem do sieci rozdzielczych różnego typu źródeł energii. Przyłączanie źródła energii elektrycznej do sieci, z punktu widzenia operatora sieci, może być realizowane według następujących zasad:

1. *Przyłącz i zapomnij*. Do sieci przyłączane są źródła, których praca z ich mocą maksymalną (znamionową) nie prowadzi do wystąpienia przeciążeń w tej sieci ani do wystąpienia przekroczeń poziomów napięć. Operator systemu w takim przypadku nie jest przymuszony (chodzi o względy techniczne) do śledzenia wartości mocy generowanej oraz do kontroli stopnia obciążenia elementów sieci (linii elektroenergetycznych, transformatorów) i poziomów napięć.

### Streszczenie

W artykule przedstawiono rozważania dotyczące rozwoju sieci rozdzielczych nasyconych tzw. generacją rozproszoną, w kontekście maksymalnego i optymalnego wykorzystania tych sieci. Pod pojęciem maksymalnego wykorzystania sieci rozdzielczej promieniowej rozumie się jej pracę z obciążeniami linii elektroenergetycznych równymi lub zbliżonymi do dopuszczalnych długotrwale.

Z kolei pod pojęciem optymalnego wykorzystania takiej sieci rozumie się stan jej pracy prowadzący do minimalizacji strat mocy i energii w liniach. Pierwszy, jak i drugi z powyższych stanów pracy, może być uzyskany przez odpowiednie rozłożenie generacji rozproszonej w sieci tego typu.

Sieci elektroenergetyczne pracujące według tej zasady należy uznać za najslabiej wykorzystane z punktu widzenia ich zdolności przesyłowych.

2. *Przyłącz, steruj lokalnie i zapomnij.* W tym przypadku źródło energii musi być wyposażone w regulator/ogranicznik mocy czynnej wprowadzanej przez nie do sieci. Nastawa regulatora/ogranicznika ma na celu niedopuszczenie do wystąpienia przeciążenia w sieci elektroenergetycznej. Układ regulacji takiego źródła pracuje autonomicznie, korzystając tylko z lokalnych pomiarów. Operator systemu nie dokonuje tu w trybie *on-line* zmian mocy generowanej przez źródło, tj. źródło nie podlega sterowaniu operatorskiemu.

Sieci elektroenergetyczne pracujące według tej zasady należy uznać za dość dobrze wykorzystane z punktu widzenia ich zdolności przesyłowych.

3. *Przyłącz i aktywnie steruj.* W tym przypadku źródło wymaga aktywnego sterowania przez odpowiedniego operatora systemu. Wynika to z mocy maksymalnej (znamionowej) źródła w stosunku do struktury i parametrów sieci, a w tym do jej zdolności przesyłowych. Sterowanie to może być realizowane na różne sposoby, tj. *on-line* lub *off-line*. Praca źródła, a w tym moc generowana w poszczególnych okresach czasu, może być wynikiem realizacji usługi systemowej świadczonej przez źródło na rzecz operatora systemu.

Sieci elektroenergetyczne pracujące według tej zasady należy uznać za potencjalnie zdolne do dobrego wykorzystania z punktu widzenia ich zdolności przesyłowych. O stopniu wykorzystania zdolności przesyłowych tych sieci decydują lokalizacja i rodzaj źródeł podlegających sterowaniu operatorskiemu oraz stosowane algorytmy sterowania i regulacji.

Aktywne oddziaływanie na źródło wytwórcze energii elektrycznej jest typowym działaniem realizowanym dotychczas tylko przez operatora systemu przesyłowego. Operator systemu przesyłowego do realizacji powyższego zadania jest wyposażony w odpowiednią infrastrukturę techniczną i organizacyjną. Sterowanie to odnosi się jednak tylko do jednostek wytwórczych dużej mocy, a więc do stosunkowo małej liczby obiektów. To implikuje względną łatwość realizacji takiego procesu w sensie infrastruktury informatycznej i algorytmów sterowania.

Wzrost nasycenia systemów elektroenergetycznych małymi i bardzo małymi źródłami energii elektrycznej spowoduje konieczność włączenia bardzo dużej liczby tych źródeł w procesy regulacyjne, realizowane w systemie elektroenergetycznym. W tym do budowy infrastruktury i systemów sterowania (sieci informatyczne, układy pomiarowe, algorytmy regulacyjne, struktury organizacyjne operatora, itd.), tzw. *smart grids*.

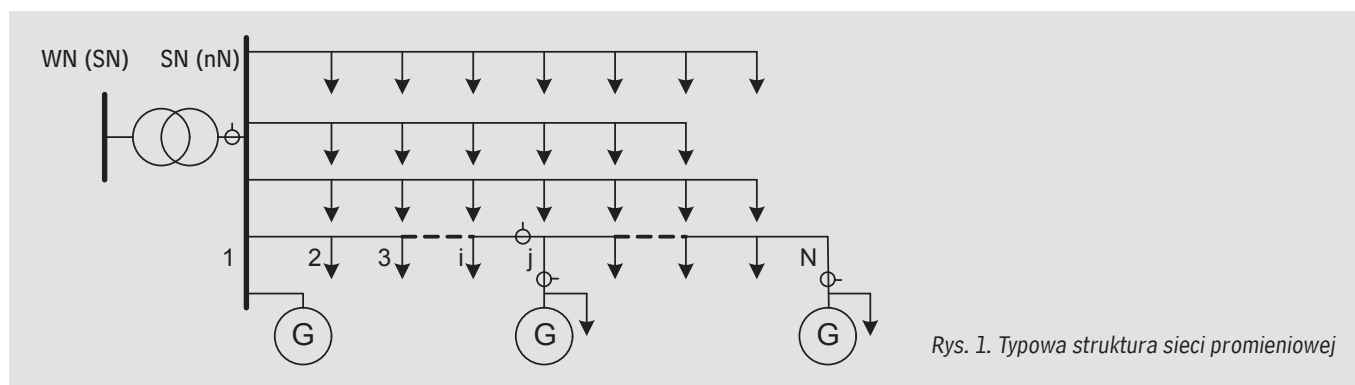
Można również stwierdzić, że część tych małych źródeł nigdy nie będzie podlegała sterowaniu scentralizowanemu. Będą to źródła w dalszym ciągu przyłączane według zasady *przyłącz i zapomnij* lub *przyłącz, steruj lokalnie i zapomnij*.

## 2. MOC MAKSYMALNA ŹRÓDEŁ PRZYŁĄCZANYCH DO SIECI PROMIENIOWEJ

### 2.1. Przyłączenie źródła na końcu gałęzi

Sieci niskiego i średniego napięcia w KSE w znakomitej większości pracują jako sieci promieniowe. Sieci te budowane są jako napowietrzne z wykorzystaniem przewodów gołych lub izolowanych oraz jako sieci kablowe. W sieciach tego typu mogą pracować różnego typu mikroźródła energii elektrycznej, jak elektrownie wiatrowe, wodne, ciepłne (gazowe, biogazowe, biomasowe) lub źródła fotowoltaiczne.

Typową strukturę sieci przedstawia rys. 1. Źródła energii elektrycznej w takiej sieci mogą być przyłączane do szyn dolnego napięcia (nN lub SN) transformatora zasilającego tę sieć (generator  $G_1$ ) oraz do istniejących (odbiorczych) lub nowych węzłów sieci (generatory  $G_j$  i  $G_N$ ).



Rys. 1. Typowa struktura sieci promieniowej



Maksymalna wartość mocy źródła, jakie zgodnie z zasadą *przyłącz i zapomnij* może być przyłączone do sieci promieniowej, jak na rys. 1, w przypadku jego lokalizacji na końcu promienia, gdy w danej gałęzi nie znajdują się inne źródła, jest równa<sup>1</sup>:

$$S_{nG,N} = S_{dd,N,N-1} + S_{mO,N} \quad (1)$$

gdzie  $S_{dd,N,N-1}$  jest dopuszczalnym maksymalnym obciążeniem linii elektroenergetycznej na odcinku  $N \div N-1$  i wynika wprost z wartości prądu dopuszczalnego długotrwale przewodu linii, a  $S_{mO,N}$  jest mocą minimalną (w dowolnie długim czasie) pobieraną przez odbiór w węźle  $N$ .

W przypadku, gdy w danej gałęzi znajdują się już inne źródła i najbliższe węzła  $N$  źródło jest przyłączone do węzła  $j$ , moc maksymalna, jaką można przyłączyć do węzła  $N$ , jest równa:

$$S_{(nG,N)} = S_{(dd,i,j)} + \sum_{l=j}^N S_{mO,l} - S_{nG,j} \quad (2)$$

Między innymi oznacza to, że gdy  $S_{nG,j} = S_{dd,i,j}$ , a minimalne obciążenia  $S_{mO,l}$  są równe zeru, to w węźle  $N$  nie można przyłączyć źródła energii.

Dla wartości mocy znamionowej źródła, określonej przez zależności (1) i (2), z punktu widzenia obciążalności dopuszczalnej sieci nie ma znaczenia wartość mocy pobieranej przez odbiór w węźle  $N$ , jak i wartość mocy generowanej przez źródło. Oznacza to, że nawet w przypadku pracy źródła z mocą znamionową i braku poboru mocy (energii) w węźle  $N$ , linia elektroenergetyczna nie zostanie przeciążona. Jest to zatem sposób włączenia źródła do pracy w sieci według zasady: *przyłącz i zapomnij*.

Jako zalety powyższego rozwiązania można wskazać:

- Poprawę warunków napięciowych, tj. zmniejszenie spadków napięć oraz wzrost zapasu stabilności napięciowej (choć zazwyczaj nie jest ona problemem w sieciach nN oraz w mniejszym stopniu w sieciach SN)
- Brak wymogu rozbudowy sieci
- Zmniejszenie strat mocy (energii) w sieci
- Brak wymogu włączenia się operatora sieci w aktywne prowadzenie jej ruchu (zasada *przyłącz i zapomnij*).

Natomiast elementem niekorzystnym może być tu pogorszenie się jakości energii. Będzie to jednak zależało od cech źródła energii, a nie od węzła przyłączenia źródła czy mocy znamionowej. Pogorszenie się jakości energii w pewnym zakresie, tj. do poziomu wyznaczonego przez normy i przepisy, jest jednak dopuszczalne.

Większe wykorzystanie istniejącej sieci elektroenergetycznej jest możliwe w przypadku zwymiarowania źródła na moc równą:

$$S_{dd,N,N-1} + S_{mO,N} < S_{nG,N} \leq S_{dd,N,N-1} + S_{MO,N} \quad (3)$$

gdzie  $S_{MO,N}$  jest maksymalną mocą pobieraną przez odbiór w węźle  $N$ . Moc ta w praktyce może wynikać z wartości prądu znamionowego bezpieczników w przyłączu odbioru w węźle  $N$ .

W powyższym przypadku niezbędne jest jednak ograniczanie mocy  $S(t)_{G,N}$  generowanej przez źródło w danej chwili czasu  $t$  do wartości:

$$S(t)_{G,N} = S_{dd,N,N-1} - S(t)_{O,N} \leq S_{nG,N} \quad (4)$$

1 W rozważaniach i zależnościach przedstawionych w niniejszym artykule pomija się straty mocy w sieci. Podane zależności mają zatem charakter przybliżony. Moce maksymalne (znamionowe) źródeł wyrażono w postaci mocy pozornych. Można je tu jednak traktować, z pewnym przybliżeniem, jako moce czynne. Powyższe jest uproszczeniem mającym na celu sformułowanie maksymalnie prostych zależności o charakterze inżyniersko-utilitytarnym.

Źródło tego typu wymaga zatem regulatora/ogranicznika wartości mocy wprowadzanej do sieci. Regulator ten powinien mierzyć moc lub prąd na odcinku  $N \div N-1$  i utrzymywać różnicę mocy generowanej  $P(t)_{G,N}$  i pobieranej w węźle  $S(t)_{O,N}$  nie większą niż moc maksymalna dopuszczalna  $S_{dd,N,N-1}$  lub prąd dopuszczalny danego odcinka linii  $I_{dd,N,N-1}$ . Utrzymywanie wartości mocy równej  $S_{dd,N,N-1}$  (lub prądu  $I_{dd,N,N-1}$ ) oznacza pełne wykorzystanie istniejącego odcinka sieci, tj. odcinka  $N \div N-1$ . Energia wprowadzana wówczas do sieci będzie zużywana przez kolejne odbiory w gałęzi, tj. odbiory ulokowane w węzłach  $N-1$ , ewentualnie  $N-2$ , itd.

Pełne wykorzystanie źródła będzie miało miejsce, gdy powyższe źródło będzie w stanie wytwarzać energię elektryczną w okresach maksymalnego poboru mocy przez odbiory w węźle  $N$ . Wówczas źródło będzie zasilalo odbiory w węźle  $N$  oraz dodatkowo przesyłało energię do sieci. Natomiast w okresach, gdy zapotrzebowanie na energię w węźle  $N$  jest mniejsze niż maksymalne, źródło nie będzie w pełni wykorzystane.

Praca źródła z mocą powodującą przepływ w odcinku sieci  $N \div N-1$  mocy dopuszczalnej maksymalnej prowadzi do wzrostu strat mocy (energii) w tym i ewentualnie w jednym lub kilku kolejnych odcinkach oraz do zmniejszenia się strat w odcinkach następnym. Sumaryczny efekt będzie jednak zawsze wynikał z konkretnej konfiguracji sieciowej.

W powyższym przypadku, w stosunku do poprzedniego, zachowane zostają wymienione powyżej zalety i wady.

Pojawia się tu jednak wymóg realizacji układu sterowania mocą generowaną przez źródło w postaci ogranicznika mocy przesyłanej gałęzią  $N \div N-1$ .

## 2.2. Przyłączenie źródła do węzła wewnętrznego gałęzi

W przypadku przyłączenia do sieci promieniowej, jak na rys. 1, źródła ulokowanego w węźle  $j$ , gdzie  $1 < j < N$ , tj. ulokowanego pomiędzy węzłem początkowym 1 i końcowym  $N$ , maksymalna wartość mocy źródła jest równa:

- gdy za węzłem  $j$ , tj. pomiędzy  $j+1$  i  $N$ , nie są zainstalowane źródła energii:

$$S_{nG,j} = \min \{S_{dd,i,j} + S_{mO,j}, S_{dd,j}\} \quad (5)$$

- gdy za węzłem  $j$ , tj. pomiędzy  $j+1$  i  $N$  są (mogą być) zainstalowane źródła energii:

$$S_{nG,j} = \min \{S_{dd,j}, S_{dd,i,j} + \sum_{k=j+1}^N S_{nG,k} + \sum_{k=j}^N S_{mO,k}\} \quad (6)$$

gdzie:

$S_{dd,i,j}$  – moc maksymalna dopuszczalna odcinka linii  $i-j$

$S_{dd,j}$  – moc maksymalna dopuszczalna przyłącza (ew. wewnętrznej linii zasilającej)

Zazwyczaj zdolności przesyłowe przyłącza są mniejsze niż linii promieniowej, tj. w ogólności prawdziwa jest zależność  $S_{dd,j} \leq S_{dd,i-j}$

$S_{mO,k}$  – moc minimalna odbiorów (moc pobierana) w węźle  $k$

$S_{nG,k}$  – moc znamionowa źródła w węźle  $k$ .

Zależności (5) i (6) są zależnościami konserwatywnymi, ale mieszczącymi się w zasadzie przyłącz i zapomnij. W jednym i drugim przypadku nawet brak poboru mocy w danej gałęzi sieci nie spowoduje wystąpienia przekroczeń dopuszczalnego obciążenia gałęzi tej sieci.

Warto tu zwrócić uwagę na fakt, że gdy moce minimalne odbiorów są równe zeru, a moc znamionowa generatora lub suma mocy znamionowych generatorów ulokowanych za węzłem  $j$  jest równa mocy dopuszczalnej odcinka  $i-j$  oraz gdy obciążenia dopuszczalne długotrwale wszystkich odcinków sieci są jednakowe, to do węzła  $j$  nie można przyłączyć źródła energii. W takim bowiem przypadku odcinek  $i-j$  sieci i tak, tj. bez źródła w węźle  $j$ , będzie obciążony mocą dopuszczalną.

W powyższym przypadku, w stosunku do poprzedniego, zachowane zostają wymienione powyżej zalety i wady.

Analogicznie, jak w przypadku przyłączania źródła na końcu gałęzi, zastosowanie układu regulacji mocy wprowadzanej przez dany węzeł (rozumianej jako różnicę pomiędzy mocą generowaną i pobieraną w węźle)



umożliwia przyłączenie źródeł o mocy większej niż wynikająca z zależności (5) i (6). Jest to przyłączenie według zasady: *przyłącz, steruj lokalnie i zapomnij*. W takim przypadku, bez względu na to, czy za węzłem  $j$ , tj. pomiędzy węzłami  $j+1$  i  $N$ , są lub nie ma zainstalowanych źródeł energii, maksymalna wartość mocy źródła powinna spełniać warunek:

$$S_{nG,j} \leq \min \{ S_{dd,i,j} + \sum_{k=j}^{k=N} S_{MO,k} - \sum_{k=j+1}^{k=N} S_{nG,k}, S_{dd,j} + S_{MO,j} \} \quad (7)$$

gdzie spełniony powinien być warunek:

$$S_{dd,i,j} + \sum_{k=j}^{k=N} S_{MO,k} - \sum_{k=j+1}^{k=N} S_{nG,k} \leq S_{dd,j,j+1} \quad (8)$$

W takim przypadku regulator mocy elektrowni przyłączonej do węzła  $j$  musi utrzymywać moc zadaną, nie większą niż zdolności przesyłowe odcinka sieci  $i-j$  lub przyłącza  $j$ .

W sieci takiej mogą się zdarzyć stany, w których praca źródeł bliższych węzła 1 będzie ograniczona do mocy pobieranej przez odbiory w węzle przyłączenia źródła. Zdarzyć się tak może, gdy np. cała gałąź ( $1 \div N$ ) zbudowana jest przewodem jednego typu, a odbiory nie pobierają mocy. Wówczas ostatnie w gałęzi źródło będzie wprowadzało do sieci moc równą dopuszczalnej danej gałęzi, a pozostałe (pomijając straty mocy i energii) będą pracowały z mocą równą mocy pobieranej przez odbiory w węzle przyłączenia odbiorów.

Powyższe dotyczy sytuacji przyłączania źródeł w kolejności od końca gałęzi (węzeł  $N$ ) do jej początku. Jeśli jako pierwsze przyłączone zostało źródło ulokowane w środku gałęzi, to ono będzie miało (może mieć) największą moc znamionową. Wówczas pozostałe w gałęzi źródła będą miały moc małą lub, w przypadku gdy obciążenie minimalne gałęzi (sumaryczne obciążenie minimalne odbiorów w gałęzi) jest równe zeru, nie będą mogły być przyłączone. Kolejność przyłączania źródeł w gałęzi sieci ma tu decydujące znaczenie.

Przyłączenie źródła według podanych zasad dalej zachowuje wymienione powyżej zalety i wady. Może się tu jednak pojawić problem realizacji układu sterowania mocą generowaną przez źródło. Dotyczy to sieci napowietrznych – typowych dla wsi i części osiedli domków jednorodzinnych. Gdy zaistnieje potrzeba sterowania/ograniczania mocy przepływającej gałęzią  $i-j$ , należałoby zainstalować przekładniki pomiarowe na słupach linii napowietrznej  $nN$ . Skomplikowałyby to układ sterowania i podnosiły koszty. Nie jest to jednak przedsięwzięcie technicznie nierealizowalne.

### 2.3. Przyłączenie źródeł do szyn rozdzielni SN ( $nN$ )

W przypadku przyłączenia źródła energii elektrycznej do szyn rozdzielni SN ( $nN$ ) (węzeł 1 na rys. 1) maksymalna moc źródła jest równa:

- przy braku układu sterowania wartością mocy generowanej przez źródło, uzależniającą moc generowaną od mocy przepływającej przez transformator:
  - gdy do sieci nie są przyłączone inne źródła energii:

$$S_{nG,1} = S_{nT} + \sum_{l=1}^{Ng} (\sum_{k=2}^{Nl} S_{mO,l,k}) \quad (9)$$

– gdy do sieci są przyłączone inne źródła energii:

$$S_{nG,1} = S_{nT} + k_j \times \sum_{l=1}^{Ng} (\sum_{k=1}^{k=Nl} S_{mO,l,k} - \sum_{l=1}^{Ng} (\sum_{k=2}^{k=Nl} S_{nG,l,k})) \quad (10)$$

gdzie

- $Ng$  – liczba gałęzi w danej sieci promieniowej
- $Nl$  – liczba węzłów w gałęzi  $l$
- $k_j$  – współczynnik jednoczesności
- $S_{nT}$  – moc znamionowa transformatora sieciowego.



- w przypadku zastosowania układu sterowania uzależniającego moc generowaną od mocy przepływającej przez transformator:

$$S_{nG,l} \leq S_{nT} + k_j \times \sum_{l=1}^{k=NI} (S_{MO,l,k}^{k=NI}) - \sum_{l=1}^{Ng} (\sum_{k=2}^{k=NI} S_{nG,l,k}) \leq 2S_{nT} \quad (11)$$

Zależności (9) i (10) odnoszą się do zasady: *przyłącz i zapomnij*. Wartość mocy generowanej przez źródło w danej chwili czasu może być tu dowolna (ale nie większa od znamionowej  $S_{nG,l}$ ) i nie musi być skorelowana z mocą pobieraną w danej chwili przez odbiory.

Z punktu widzenia sieci (operatora sieci), a w tym strat mocy (energii), przyłączenie to jest „niezauważalne”. Powodować natomiast może pewien wzrost poziomów napięć, wynikający ze zmniejszenia spadku napięcia na transformatorze sieciowym (WN/SN lub SN/nN). Będzie to zależało od trybu pracy regulatora tego źródła (regulacja napięcia, mocy biernej lub współczynnika mocy) i wartości zadanej wielkości regulowanej.

Zależność (11) odnosi się do stanu z układem sterowania mocą czynną generowaną przez źródło (zasada: *przyłącz, steruj lokalnie i zapomnij*). Regulator/ogranicznik mocy czynnej źródła powinien utrzymywać tu przepływ mocy zadanej przez transformator w kierunku do sieci SN, na poziomie nie większym od mocy znamionowej transformatora sieciowego  $S_{nT}$ .

### 3. PRZYKŁAD PRZYŁĄCZANIA ŹRÓDEŁ ENERGII DO SIECI PROMIENIOWEJ

#### 3.1. Model sieci

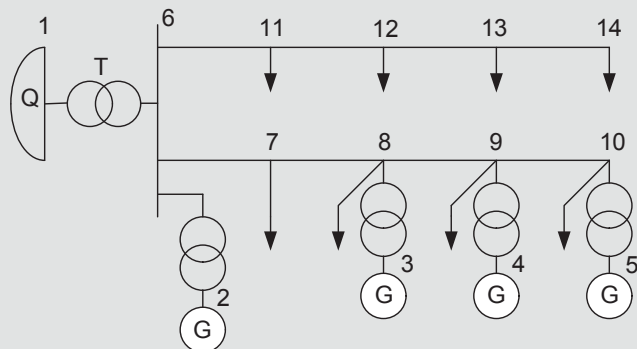
Poniżej opisano przykład odnoszący się do sieci SN promieniowej (lub pracującej jako promieniowa). Strukturę sieci, będącej przedmiotem rozważań, przedstawiono na rys. 2. Rozważana sieć SN składa się z 2 gałęzi – linii kablowych typu 3×YHAKXS 150 mm<sup>2</sup>, o długościach pomiędzy poszczególnymi węzłami równych 2 km. Przyjęto następujące parametry linii kablowych:  $R' = 0,268 \Omega/km$ ,  $X' = 0,199 \Omega/km$ ,  $C' = 0,27 \mu F/km$ ,  $I_{dd} = 355 A$ ,  $I_{thl} = 14,1 kA$ .

Na każdym z promieni ulokowano po cztery węzły odbiorcze, których jednakową (dla uproszczenia) dobową zmienność obciążenia przedstawia rys. 3. Pomija się tu sezonową zmienność charakterystyki obciążenia.

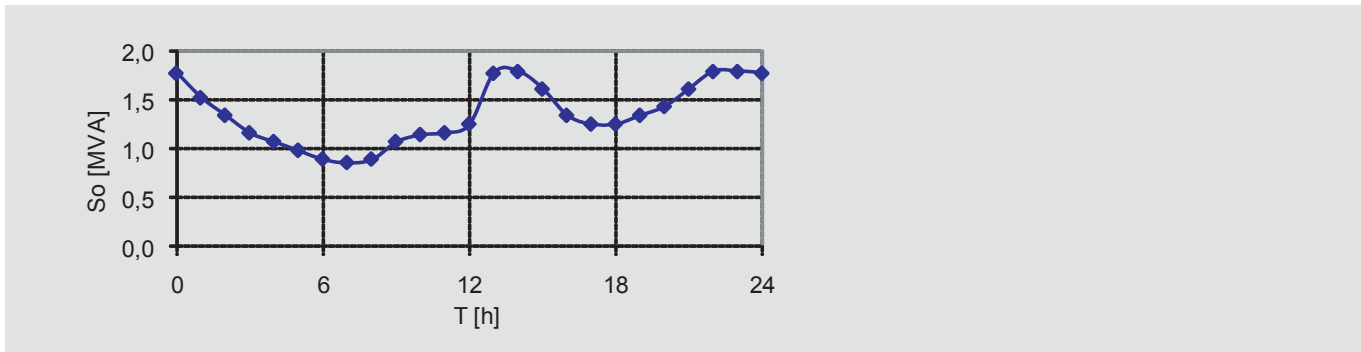
Sieć ta powiązana jest z siecią WN za pomocą pojedynczego transformatora o danych znamionowych:  $S_{nT} = 16 MVA$ ,  $\vartheta = 115/15,75 kV/kV$ ,  $u_k = 11\%$ ,  $\Delta P_{cum} = 91,5 kW$ .

Przyjęto, że w sieci tej znajdują się 4 źródła energii – generatory  $G_2$ ,  $G_3$ ,  $G_4$  i  $G_5$ . Przyłączone są one, poprzez transformatory blokowe, do węzłów odbiorczych 8, 9, 10 oraz do szyn rozdzielni SN (węzeł 6). Moce znamionowe transformatorów blokowych dostosowano do mocy źródeł.

W rozważaniach pominięto działanie regulatora napięcia transformatora WN/SN. Przyjęto natomiast, że napięcie po stronie górnego napięcia tego transformatora jest niezmiennie i równe 1,04, w jednostkach względnych (jw.).



Rys. 2. Schemat przykładowej sieci SN



Rys. 3. Dobowa zmienność obciążenia węzłów odbiorczych,  $tg\varphi_o = 0,1$

Dla tak określonego obiektu poniżej przedstawiono pracę sieci w postaci poziomów napięć i obciążenia jej elementów, w przypadku, gdy źródła przyłączane są do tej sieci według zasad opisanych powyżej, tj. zasady przyłącz i zapomnij oraz przyłącz, steruj lokalnie i zapomnij.

### 3.2. Sieć ze źródłami przyłączanymi według zasady: przyłącz i zapomnij

Zgodnie z zależnościami przedstawionymi w poprzednim rozdziale, moce maksymalne źródeł przyłączanych do sieci elektroenergetycznej według tej zasady zależą od kolejności ich przyłączania do rozważanego promienia sieci. W przedstawionym przykładzie przyjęto, że jako pierwsze przyłączone zostało źródło do węzła 10. Skutkuje to tym, że moc znamionowa (maksymalna) tego źródła jest większa od mocy znamionowych (maksymalnych) źródeł przyłączonych do węzłów 8 i 9. Moce te, określone na podstawie zależności (1) dla źródła na końcu gałęzi oraz zależności (6) dla źródeł „wewnątrz” gałęzi, są odpowiednio równe:  $P_5 = 9,65 MW$ ,  $P_3 = 0,87 MW$ ,  $P_4 = 0,87 MW$ . Moc znamionową źródła przyłączonego do rozdzielni SN obliczono z zależności (9). Jest ona równa  $P_2 = 8,09 MW$ .

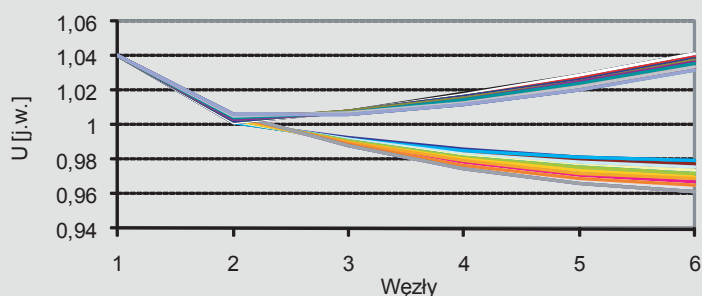
Rozważono tu dwa warianty pracy źródeł, tj. pracę generatora w trybie regulacji napięcia oraz w trybie regulacji współczynnika mocy. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono zmienność napięcia oraz obciążenia elementów tej sieci dla pracy źródeł w trybie regulacji napięcia (regulacja w węzłach 2, 3, 4 i 5, tj. na szynach generatorów), gdzie wartość zadana napięcia była równa 1,01 jw. (wyrażona w jednostkach względnych).

Rys. 4 przedstawia poziomy napięć obliczone dla każdej godziny doby. Górny pęk krzywych przedstawia zmienność napięć w ciągu doby w węzłach gałęzi, do której przyłączone są źródła energii (gałąź dolna na rys. 2), natomiast dolny pęk krzywych przedstawia napięcia w węzłach gałęzi bez źródeł energii (gałąź górna na rys. 2).

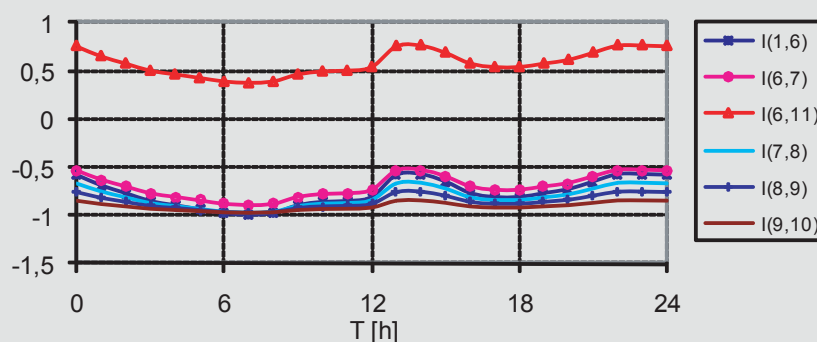
Widać tu typowy efekt sieciowy, tj. zmniejszanie się napięć w gałęzi bez źródeł, w miarę oddalania się od węzła zasilającego (np. węzeł 6), oraz wzrost napięć w gałęzi ze źródłami energii. Widać tu również znacznie mniejszą zmienność napięć w ciągu doby jako wynik zmian obciążenia dla węzłów gałęzi ze źródłami w stosunku do gałęzi bez źródeł.

Rys. 5 przedstawia względne, tj. odniesione do prądu dopuszczalnego długotrwale linii i transformatora, obciążenie elementów sieci w ciągu doby. Widać tu, że przyłączenie źródeł zgodnie z zasadą przyłącz i zapomnij powoduje w gałęzi ze źródłami zmianę kierunku przepływu mocy (energii). Moc płynie w kierunku rozdzielni SN (wartości dodatnie oznaczają przepływ od węzła 6 w kierunku odbiorów, wartości ujemne – przepływ w kierunku węzła 6). Widać tu, że w okresach minimalnego obciążenia węzłów odbiorczych przepływy w gałęziach 9–10, 8–9, 7–8 oraz w transformatorze WN/SN (gałąź 1–6) zbliżają się do znamionowych dla tych elementów. W pozostałych okresach obciążenia elementów sieci są mniejsze niż znamionowe.

Warto zauważyć, że obciążenie gałęzi 6–7 jest mniejsze od znamionowego również w okresie minimalnego obciążenia sieci. Wynika to z faktu, że jest ono różnicą mocy płynącej gałęzią 7–8 (dopuszczalnej dla danej gałęzi) i mocy pobieranej w węźle 7. Oznacza to równocześnie, że w gałęzi 6–7 występuje pewna rezerwa zdolności przesyłowej, a w węźle 7 rezerwa przyłączeniowa mocy, tj. w tym węźle można byłoby ulokować źródło energii.



Rys. 4. Rozkład napięć w węzłach sieci (oznaczenia węzłów: 1 – nr 1; 2 – nr 6; 3 – nr 7, 11; 4 – nr 8, 12; 5 – nr 9, 13; 6 – nr 10, 14; górne krzywe odpowiadają węzłom nr: 7, 8, 9, 10, a dolne węzłom nr: 11, 12, 13 i 14; źródła pracują w trybie regulacji napięcia:  $U_z = 1,01$ )

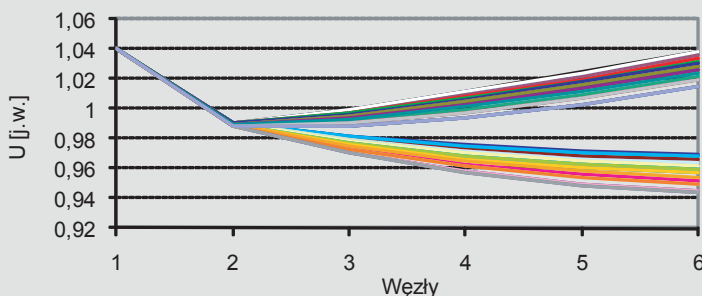


Rys. 5. Obciążenie elementów sieci w wariancie przylącz i zapomnij (źródła pracujące w trybie regulacji napięcia:  $U_z = 1,01$ )

W przypadku pracy źródeł w trybie regulacji współczynnika mocy sytuacja, w sensie ilościowym, ulega pewnej zmianie, natomiast jakościowo praca sieci jest zbliżona do omówionej powyżej. Założono tu, że źródła energii pracują ze współczynnikiem mocy równym  $tg\varphi_{Gz} = -0,2$ , co oznacza, że pobierają one moc bierną z sieci. Przy takim sposobie pracy (niezgodnym z wymaganiami operatorów systemów, którzy wymagają pracy źródeł z mocą bierną równą zeru) zmniejsza się wzrost napięcia spowodowany wprowadzaniem mocy do sieci przez źródła, ale zwiększa się obciążenie transformatora WN/SN mocą bierną i tym samym zwiększa się spadek napięcia w tym transformatorze.

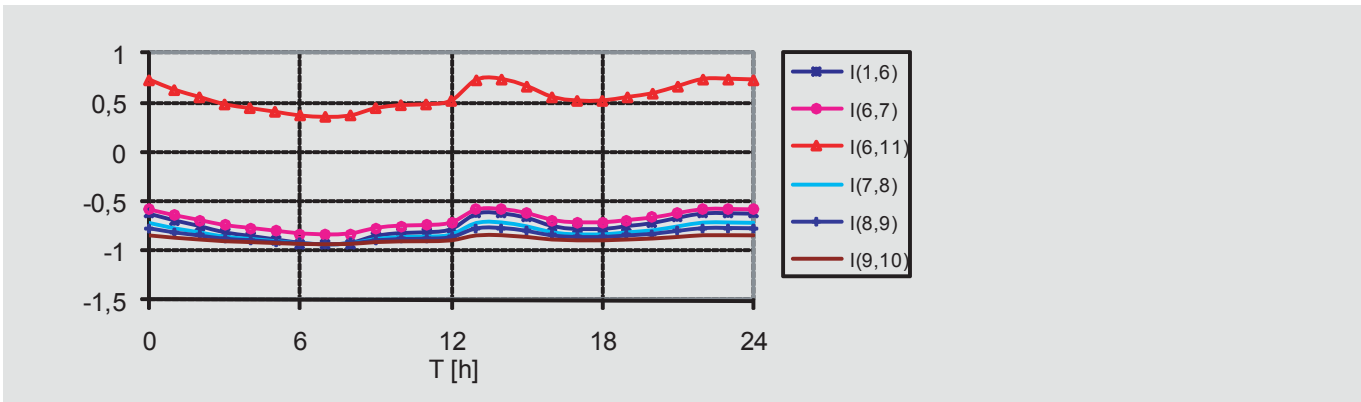
Porównując zmienność napięć z rys. 6 z rys. 4, widać, że praca źródeł w trybie regulacji współczynnika mocy prowadzi do istotnego, chociaż mieszczącego się w zakresie napięć dopuszczalnych, wzrostu zmienności napięć w węzłach odbiorczych (i u odbiorców). Można zatem stwierdzić, że praca źródeł w trybie regulacji napięcia, z punktu widzenia zmienności napięć, jest uzasadniona, chociaż nie bezwzględnie wymagana.

Porównanie rys. 7 i 5 nie wykazuje większych, w tym ilościowych, różnic. W dolinach obciążenia przepływu mocy w elementach sieci ulokowanych przed źródłami zbliżają się do znamionowych.



Rys. 6. Rozkład napięć w węzłach sieci (oznaczenia węzłów: 1 – nr 1; 2 – nr 6; 3 – nr 7, 11; 4 – nr 8, 12; 5 – nr 9, 13; 6 – nr 10, 14; górne krzywe odpowiadają węzłom nr: 7, 8, 9, 10, a dolne węzłom nr: 11, 12, 13 i 14; źródła pracują w trybie regulacji współczynnika mocy:  $tg\varphi_{Gz} = -0,2$ )





Rys. 7. Obciążenie elementów sieci w wariancie przyłącz i zapomnij (źródła pracują w trybie regulacji współczynnika mocy:  $tg\varphi_{Gz} = -0,2$ )

### 3.3. Sieć ze źródłami przyłączanymi według zasady: *przyłącz, steruj lokalnie i zapomnij*

Przyłączanie źródeł do sieci rozdzielczych zgodnie z zasadą *przyłącz i zapomnij* prowadzi do wzrostu wykorzystania ich zdolności przesyłowych. Pełne, a właściwie największe wykorzystanie tych zdolności ma miejsce jednak tylko w okresach minimalnego obciążenia sieci. W pozostałym czasie, tj. w istocie przez większość doby, roku czy okresu eksploatacji, zdolności te nie są wykorzystane.

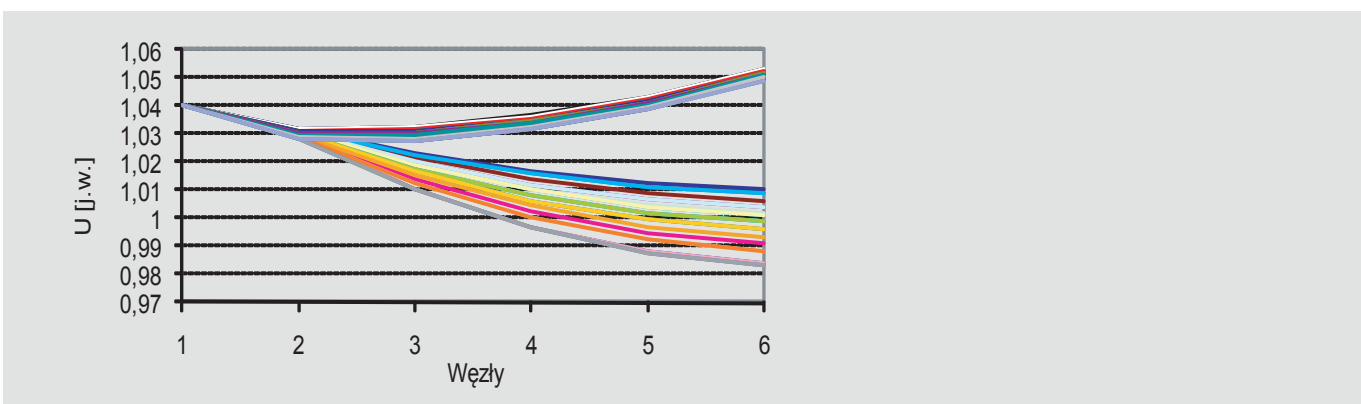
Przyłączanie źródeł zgodnie z zasadą *przyłącz, steruj lokalnie i zapomnij* umożliwia zwiększenie poziomu wykorzystania sieci. Pokazano to poniżej.

W rozważanym przypadku regulacji podlegają przepływy prądu w odcinkach sieci ulokowanych przed (patrząc w kierunku transformatora WN/SN) węzłem, do którego przyłączone jest dane źródło. Realizuje się to przez sterowanie wartością mocy czynnej wprowadzanej przez źródło do sieci. Oznacza to przykładowo, że dopuszczalny długotrwałe przepływ mocy w gałęzi 9–10 utrzymywany jest poprzez sterowanie wartością mocy czynnej generowanej przez źródło w węźle 5 (generator G5), przepływ w gałęzi 8–9 utrzymywany jest poprzez sterowanie wartością mocy czynnej generowanej przez źródło w węźle 4 (G4), przepływ w gałęzi 7–8 utrzymywany jest poprzez sterowanie wartością mocy czynnej generowanej przez źródło w węźle 3 (G3). Natomiast przepływ w transformatorze WN/SN (gałąź 8–9) utrzymywany jest poprzez sterowanie wartością mocy czynnej generowanej przez źródło w węźle 3.

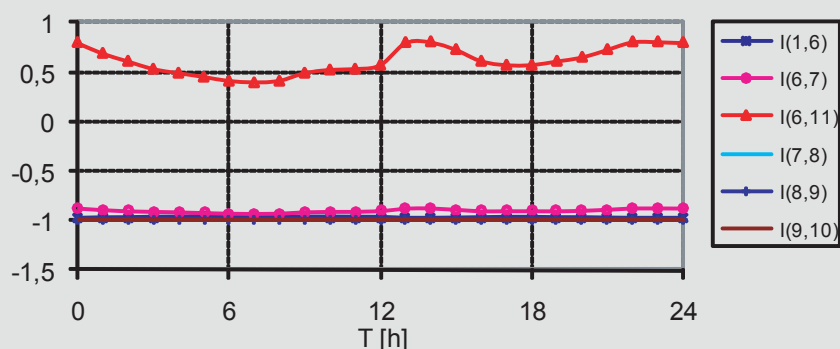
W pierwszym wariancie rozważano pracę źródeł w trybie regulacji napięć. Przyjęto tu, że wartość zadana napięcia generatora G2 (węzeł 2) jest równa 1,08 jw. Ma to na celu ograniczenie przepływu mocy biernej w transformatorze WN/SN. W pozostałych źródłach utrzymywane jest napięcie niższe, równe 1,01 jw.

Jak wynika z rys. 8, rozkład napięć w sieci jest wówczas zbliżony do przedstawionego na rys. 4. Widać wyższy poziom napięcia na szynach SN transformatora (węzeł 6) oraz nieco mniejszą zmienność napięć w gałęzi ze źródłami energii.

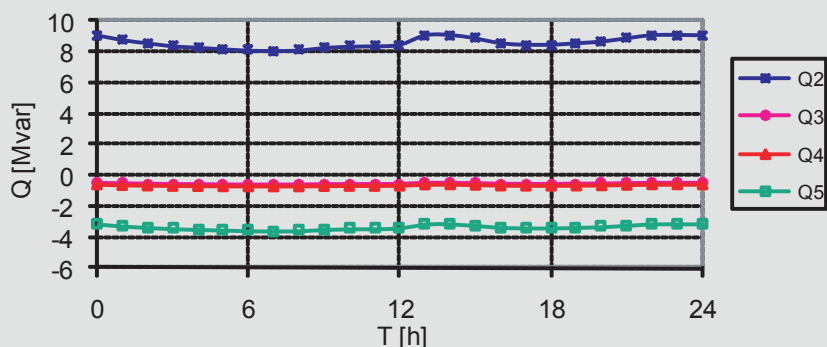
Wykorzystanie zdolności przesyłowych sieci staje się większe, co pokazuje rys. 9. W pełni wykorzystane są zdolności przesyłowe gałęzi sieci, za którymi ulokowane są źródła. Przepływy prądów w gałęziach 1–6, 7–8, 8–9 oraz 9–10 są równe znamionowym. Przepływ w gałęzi 6–7 jest mniejszy od znamionowego, z przyczyny omówionej wcześniej.



Rys. 8. Rozkład napięć w węzłach sieci (oznaczenia węzłów: 1 – nr 1; 2 – nr 6; 3 – nr 7, 11; 4 – nr 8, 12; 5 – nr 9, 13; 6 – nr 10, 14; górne krzywe odpowiadają węzłom nr: 7, 8, 9, 10, a dolne węzłom nr: 11, 12, 13 i 14; źródła pracują w trybie regulacji napięcia:  $U_{z2} = 1,08$ ,  $U_{z3} = U_{z4} = U_{z5} = 1,01$ )



Rys. 9. Obciążenie elementów sieci w wariancie przyłącz, steruj lokalnie i zapomnij (źródła pracują w trybie regulacji napięcia:  $U_{z2} = 1,08$ ,  $U_{z3} = U_{z4} = U_{z5} = 1,01$ )

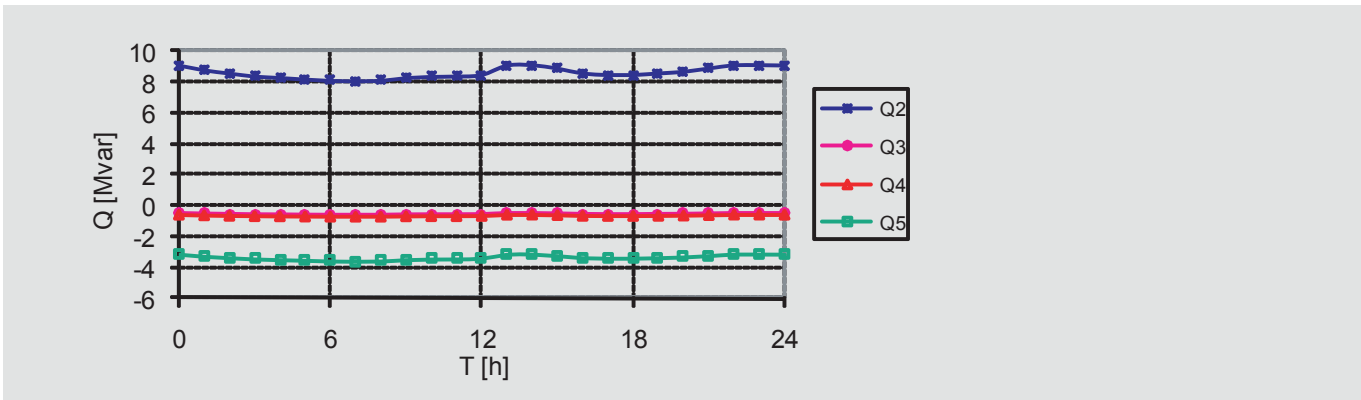


Rys. 10. Moce czynne wprowadzane przez źródła do sieci (źródła pracują w trybie regulacji napięcia:  $U_{z2} = 1,08$ ,  $U_{z3} = U_{z4} = U_{z5} = 1,01$ )

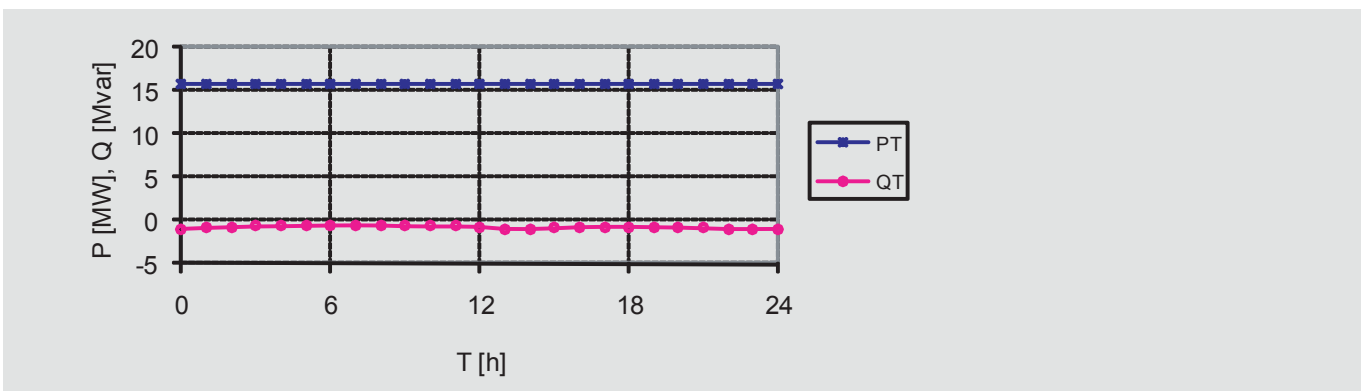
Na rys. 10 pokazano zmienność mocy czynnej, jaka jest wymagana do uzyskania efektu pokazanego na rys. 9. Na podstawie przebiegów z tego rysunku można odczytać minimalne moce źródeł, jakie są wymagane do uzyskania przedstawionego stanu. Moce te powinny być równe maksymalnym dla danego źródła odczytanym z rys. 9. W rozważanym przykładzie są one równe:  $P_2 = 20 \text{ MW}$ ,  $P_3 = 2 \text{ MW}$ ,  $P_4 = 2 \text{ MW}$ ,  $P_5 = 10 \text{ MW}$ . Moce te, podane tu w zaokrągleniu w górę, odpowiadają wynikającym z zależności (3) dla generatora G5, (7) dla generatorów G3 i G4 oraz z zależności (11) dla generatora G2.

Rys. 11 przedstawia wartości mocy biernych generowanych przez źródła wynikające między innymi z wartości napięć zadanych źródeł. Widać tu, że generator G2 wprowadza, a generator G5 pobiera dość dużą moc bierną. Moc bierna generowana przez generator G2 zużywana jest na pokrycie mocy biernej pobieranej w górnej gałęzi sieci i tym samym powoduje ograniczenie mocy biernej przepływającej przez transformator WN/SN (pokazuje to rys. 12). Wprowadzanie mocy biernej przez ten generator do sieci jest zatem uzasadnione, a nawet niezbędne. Natomiast duży pobór mocy biernej przez generator G5 nie jest uzasadniony. Pobór ten można zmniejszyć, zwiększając wartość zadaną napięcia. Przykładowo zwiększając napięcie  $U_{z5}$  do wartości 1,08, uzyskamy spadek mocy biernej pobieranej do około 1 Mvar, ale w efekcie tego nastąpi wzrost napięcia w węźle 10 do wartości równej około 1,07 jw.

Przepływami mocy biernej w transformatorze WN/SN można również sterować za pomocą baterii kondensatorów przyłączonych do szyn rozdzielni SN lub za pomocą transformatora (regulacja przekładnią transformatora). W obydwu przypadkach będzie to jednak regulacja nieciągła i stosunkowo wolna.



Rys. 11. Moce bierne wprowadzane przez źródła do sieci (źródła pracujące w trybie regulacji napięcia:  $U_{z2} = 1,08$ ,  $U_{z3} = U_{z4} = U_{z5} = 1,01$ )



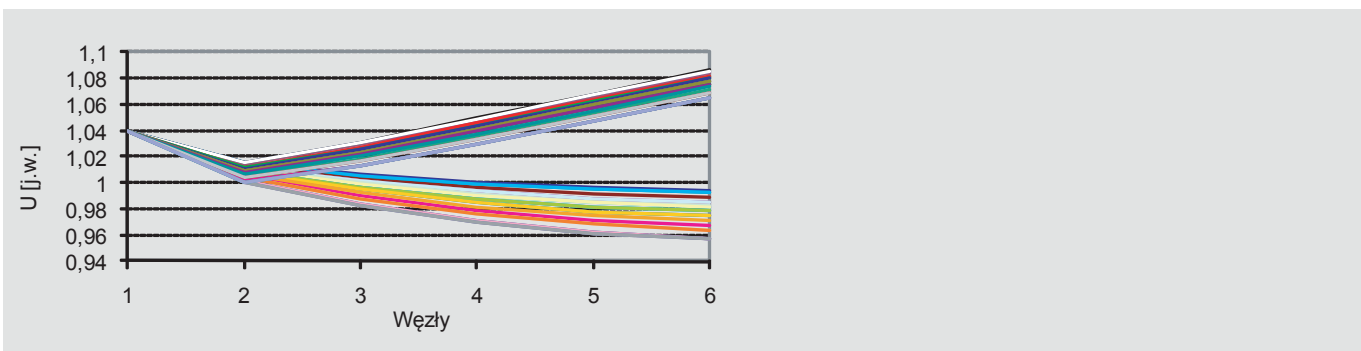
Rys. 12. Przepływ mocy czynnej i biernej przez transformator WN/SN (źródła pracujące w trybie regulacji napięcia:  $U_{z2} = 1,08$ ,  $U_{z3} = U_{z4} = U_{z5} = 1,01$ )

Stany sieci związane z pracą źródeł w trybie regulacji współczynnika mocy przedstawiono na rysunkach 13÷16. W prezentowanym przykładzie przyjęto, że źródła pracują z zadaniem współczynnikiem mocy równym  $\text{tg}\varphi_{Gz} = 0$ . Odpowiada to obecnym wymaganiom operatorów systemów i praktyce systemowej.

Na podstawie przebiegów z rysunku 15 minimalna moc źródeł, jaka teoretycznie jest wymagana do uzyskania przedstawionego stanu, jest równa:  $P_2 = 16 \text{ MW}$ ,  $P_3 = 2 \text{ MW}$ ,  $P_4 = 2 \text{ MW}$ ,  $P_5 = 11 \text{ MW}$ . Widać tu wyraźnie mniejszą, w stosunku do poprzedniego przykładu, wartość maksymalnej mocy generatora G2.

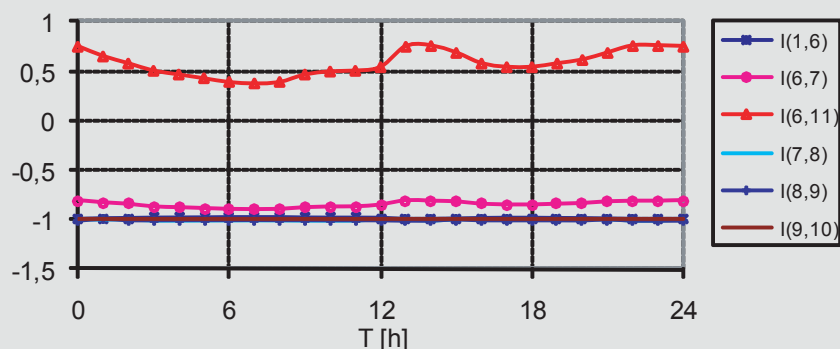
Ze względu na brak mocy biernej wprowadzanej do sieci przez generator G2 ( $\text{tg}\varphi_G = 0$ ) występują tu dość duże przepływy mocy biernej przez transformator WN/SN (rys. 16). Skutkuje to większym niż na rys. 8 (praca w trybie regulacji napięcia) spadkiem napięcia na transformatorze WN/SN oraz (o czym już wspomniano) mniejszą mocą czynną, jaka może być wprowadzona do sieci przez generator G2 (rys. 15 w stosunku do rys. 10).

Moc generatora G2, mniejsza niż uzyskana w poprzednim przykładzie, może być zwiększona do poziomu, jak pokazany na rys. 10, przez zastosowanie układu minimalizującego przepływ mocy biernej w transformatorze WN/SN, np. przez zastosowanie sterowanej baterii kondensatorów, przyłączonej do rozdzielni SN. Wykorzystanie do regulacji przepływu mocy biernej transformatora (teoretycznie możliwe) nie jest tu uzasadnione, ponieważ wówczas w rozważanej sieci nie występowałby element odpowiedzialny za utrzymanie (regulację) napięcia.

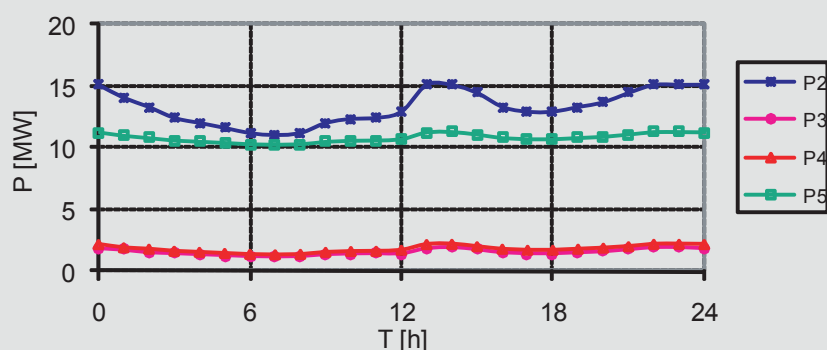


Rys. 13. Rozkład napięć w węzłach sieci (oznaczenia węzłów: 1 – nr 1; 2 – nr 6; 3 – nr 7, 11; 4 – nr 8, 12; 5 – nr 9, 13; 6 – nr 10, 14; górne krzywe odpowiadają węzłom nr: 7, 8, 9, 10, a dolne węzłom nr: 11, 12, 13 i 14; źródła pracujące w trybie regulacji współczynnika mocy:  $\text{tg}\varphi_{Gz} = 0$ )

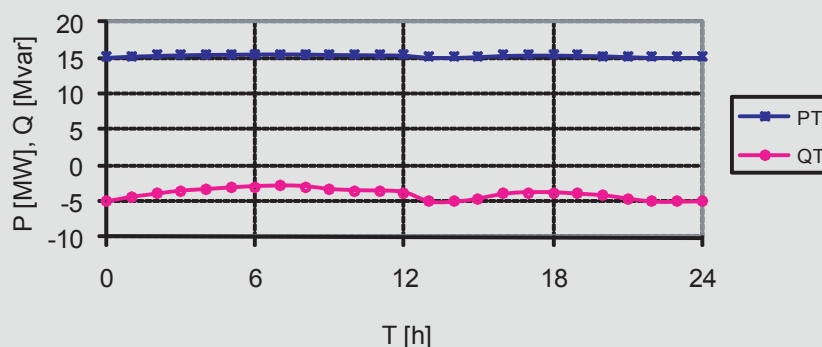
Ograniczenie wartości mocy bierniej przepływającej przez transformator WN/SN można również uzyskać, zwiększając wartość zadanego współczynnika mocy generatora G2 lub mocy bierniej zadanej tego generatora. Możliwości takiego działania są jednak ograniczone przez wzrost napięcia na końcu gałęzi ze źródłami mocy.



Rys. 14. Obciążenie elementów sieci w wariantcie przyłącz, steruj lokalnie i zapomnij (źródła pracujące w trybie regulacji współczynnika mocy:  $\text{tg}\varphi_{Gz} = 0$ )



Rys. 15. Moce czynne wprowadzane przez źródła do sieci (źródła pracujące w trybie regulacji współczynnika mocy:  $\text{tg}\varphi_{Gz} = 0$ )



Rys. 16. Przepływ mocy czynnej i bierniej przez transformator WN/SN (źródła pracujące w trybie regulacji współczynnika mocy:  $\text{tg}\varphi_{Gz} = 0$ )

#### 4. STRATY ENERGII

Zagadnieniem związanym z powyższymi rozważaniami i zarazem bardzo ważnym dla operatora sieci rozdzielczej są straty mocy czynnej i energii w sieci.

Rozważana powyżej maksymalizacja wykorzystania sieci do poziomu wynikającego z zasady *przyłącz, steruj lokalnie i zapomnij* lub *przyłącz i aktywnie steruj* prowadzi w oczywisty sposób do wzrostu strat mocy czynnej i energii w danej sieci. Wzrost ten wyrażony w jednostkach mocy lub energii wynika z kwadratowej zależności

strat mocy od wartości prądu płynącego w odcinkach linii elektroenergetycznych. Przykładowo straty w linii elektroenergetycznej o poziomie wykorzystania rzędu 50% po wzroście jej wykorzystania do 100% wzrosną czterokrotnie.

Przyłączenie źródeł generacji rozproszonej do sieci dystrybucyjnej nie musi jednak prowadzić do wzrostu strat mocy i energii. Przyłączenie źródeł o określonej mocy (mniejszej niż podawane w rozdziale 2) prowadzi bowiem (prowadzić może) do odciążenia sieci i tym samym zmniejszenia się poziomu strat mocy i energii.

Dla sieci o dowolnej strukturze problem minimalizacji strat energii w sieci można sformułować następująco. Poszukiwane są wartości prądów (mocy) wprowadzane przez źródła do systemu, dla których straty energii elektrycznej (mocy) są mniejsze niż dla sieci bez tych źródeł. Zagadnienie to formalizuje zależność:

$$E_{bezG} = \sum (\int_{T_1}^{T_2} 3 I_{ij}^2 R_{ij} dt) > \sum (\int_{T_1}^{T_2} 3 (I_{ij} - I_{Gj})^2 R_{ij} dt) = E_{zG} \quad (12)$$

gdzie:

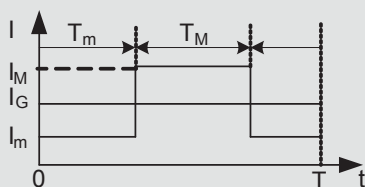
- $I_{ij}$  – prąd w gałęzi  $i-j$
- $I_{Gj}$  – prąd generatora wprowadzony do węzła  $j$
- $R_{ij}$  – rezystancja linii  $i-j$
- $t, T_1, T_2$  – czas.

Jeżeli rozważyć gałąź sieci promieniowej jak na rys. 1, przy następujących założeniach upraszczających:

- Zmienność mocy pobieranych w każdym węźle odbiorczym jest jednakowa i ma postać jak na rys. 17. Prąd pobierany przez odbiory przyjmuje dwie wartości: maksymalną  $I_M$  i minimalną  $I_m$ . Czas trwania obciążenia prądem  $I_M$  jest równy  $T_M$ , a czas trwania obciążenia prądem  $I_m$  jest równy  $T_m$
- Generacja mocy w każdym węźle jest stała w czasie i jednakowa w każdym węźle gałęzi  $I_{Gj} = I_G$
- Rezystancja  $R_{ij}$  (i reaktancja) każdej gałęzi jest identyczna,

to zależność (12) przyjmuje postać:

$$\sum_{n=1}^{N-1} (nI_M)^2 T_M + \sum_{n=1}^{N-1} (nI_m)^2 T_m > \sum_{n=1}^{N-1} (nI_M - nI_G)^2 T_M + \sum_{n=1}^{N-1} (nI_m - I_G)^2 T_m \quad (13)$$



Rys. 17. Założona przykładowa zmienność obciążenia węzłów sieci rozdzielczej

Nierówność (13) jest spełniona dla prądów źródeł z przedziału:

$$0 < I_G < \frac{2(I_M T_M + I_m T_m)}{T_M + T_m} \quad (14)$$

Funkcja  $f(I_G)$  równa różnicy lewej i prawej strony zależności (13) przyjmuje wartość minimalną dla prądu źródeł  $I_G$  równego:

$$I_{Gopt} = \frac{I_M T_M + I_m T_m}{T_M + T_m} \quad (15)$$



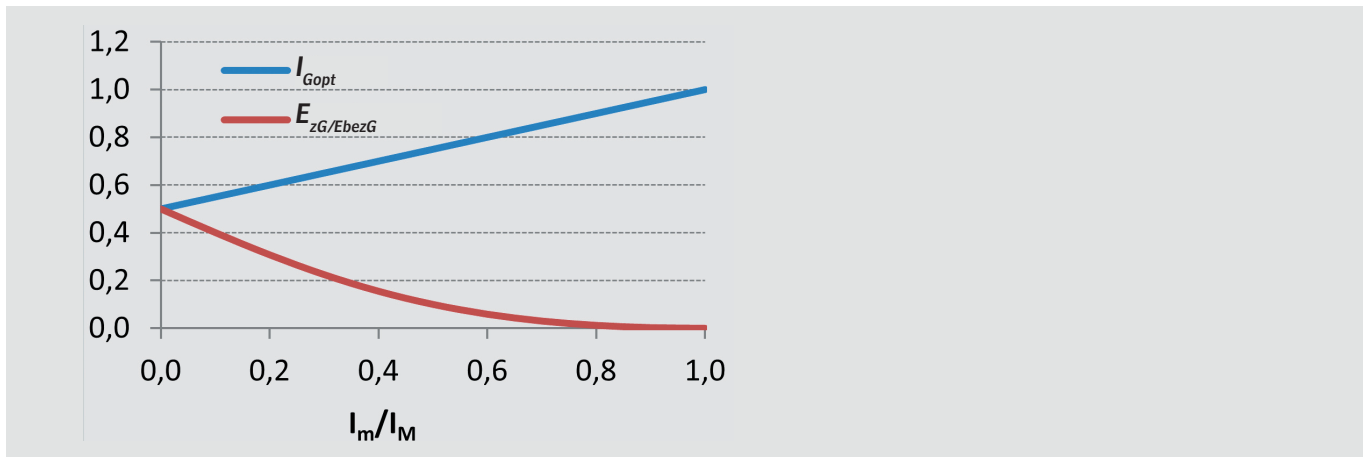
Prąd ten można przekształcić na obciążenie (np. w celu porównania z zależnościami z rozdziału 2) przez przemnożenie go przez napięcie znamionowe i 1,73.

Zmiana strat energii, tj. iloraz prawej do lewej strony zależności (13), wynikająca z pracy źródeł generujących prąd  $I_{Gopt}$  o wartości jak w zależności (15), jest równa:

$$\frac{E_{zG}}{E_{bezG}} = \frac{T_M T_m}{T_M + T_m} \frac{(I_M - I_m)^2}{I_M^2 T_M + I_m^2 T_m} \quad (16)$$

Na rys. 18 przedstawiono zależność optymalnego prądu źródeł  $I_{Gopt}$  oraz iloraz strat energii w układzie ze źródłami i bez źródeł, w sytuacji, gdy źródła wprowadzają do sieci prąd  $I_{Gopt}$  określony zależnością (15). Widać tu, że gdy prąd minimalny odbiorów  $I_m$  jest równy zeru, tzw. optymalny prąd źródeł  $I_{Gopt}$  powinien być równy połowie wartości prądu maksymalnego  $I_M$ . Wówczas straty energii zmniejszają się dwukrotnie, tj. do 50% strat w systemie bez źródeł. W miarę wzrostu wartości prądu minimalnego  $I_m$  rośnie wartość tzw. optymalnego prądu źródeł i maleją straty energii w sieci (rozważanej gałęzi).

W skrajnym przypadku, tj. gdy  $I_m = I_M$ , optymalny prąd źródeł staje się równy prądowi  $I_G = I_M$ . Wówczas straty energii w sieci spadają do zera. Dzieje się tak dlatego, ponieważ prądy źródeł stają się równe prądom pobieranym w węzłach odbiorczych.



Rys. 18. Zależność optymalnego prądu źródeł  $I_{Gopt}$  i względnej zmiany obciążenia  $E_{zG}/E_{bezG}$  od ilorazu prądów  $I_m/I_M$  dla  $T_M = T_m$

Z kolei, jeżeli źródło energii jest źródłem, które włącza się do pracy w systemie okresowo, to zależności podane powyżej ulegają modyfikacjom zależnym od tej okresowej zmienności pracy tego źródła.

Przyjmijmy, że źródłami energii w rozważanej sieci (gałęzi) są elektrownie wiatrowe, które pracują w okresie zwiększonego zapotrzebowania na energię, tj. w ciągu dnia. Jest to ponownie pewne uproszczenie. Jednak o tyle uzasadnione, że w ciągu nocy prędkość wiatru maleje i generacja elektrowni wiatrowych jest rzeczywiście mniejsza. Przyjmijmy równocześnie, że:

- elektrownie wiatrowe pracują ze stałą mocą (stały co do wartości prąd  $I_G$ )
- czas pracy elektrowni jest równy  $T_G$  i jest nie większy niż czas  $T_M$ .

Wówczas zależność (12) przyjmuje postać:

$$\sum_{n=1}^{N-1} n I_M^2 T_M > \sum_{n=1}^{N-1} (n I_M - n I_G)^2 T_G + \sum_{n=1}^{N-1} (n I_M)^2 (T_M - T_G) \quad (17)$$

W zależności tej nie występuje prąd minimalny  $I_m$ , ponieważ straty energii powodowane tym prądem występują w sieci bez źródeł energii, jak i z rozważanymi źródłami.

Funkcja  $f(I_G)$  równa różnicy lewej i prawej strony zależności (17) przyjmuje wartość minimalną dla prądu źródeł  $I_G$  równego:

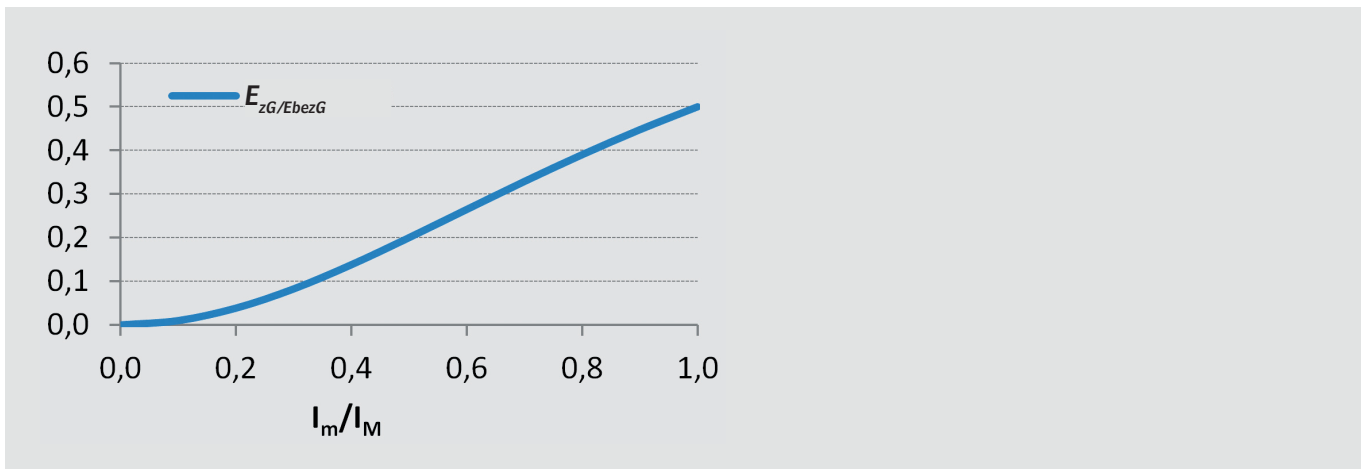
$$I_{Gopt} = I_M \quad (18)$$

Zależność (18) jest intuicyjnie zasadna, ponieważ obniżanie strat energii w sieci (gałęzi) w rozważanej sytuacji będzie miało miejsce tylko w okresach pracy źródeł. Maksymalne obniżenie strat energii wystąpi, gdy źródła będą zasilaly „swoje” odbiory, tj. minimalizowane będą przepływy energii w gałęziach sieci.

Zmiana strat energii, tj. iloraz prawej do lewej strony zależności (18), jak i 12), wynikająca z pracy źródeł generujących prąd  $I_{Gopt}$ , jak w zależności (18), będzie wówczas równa:

$$\frac{E_{zG}}{E_{bezG}} = \frac{I_M^2(T_M - T_G) + I_m^2 T_m}{I_M^2 T_M + I_m^2 T_m} \quad (19)$$

Na rys. 19 przedstawiono iloraz strat energii w układzie ze źródłami i bez źródeł, w sytuacji, gdy źródła wprowadzają do sieci tzw. prąd optymalny, określony zależnością (18), gdy czas pracy źródeł jest równy czasowi maksymalnego obciążenia sieci:  $T_G = T_M = T_m$ . Widać tu, że w miarę wzrostu prądu minimalnego  $I_m$  straty energii rosną. Efekt ten jest odwrotny do pokazanego na rys. 18.



Rys. 19. Zależność względnej zmiany strat energii  $E_{zG}/E_{bezG}$  od ilorazu prądów  $I_m/I_M$  dla  $T_G = T_M = T_m$

Podsumowując powyższe, należy stwierdzić, że przyłączanie generacji rozproszonej może prowadzić do istotnego obniżenia się strat energii w sieci rozdzielczej.

W przypadku źródeł pracujących okresowo w ciągu doby, a dokładnie w ciągu dnia, jak np. elektrownie wiatrowe (pomijając okresy przechodzenia frontu burzowego) czy źródła fotowoltaiczne, maksymalne zmniejszenie się strat energii wystąpi w przypadku pracy źródeł z mocą zbliżoną do maksymalnej mocy odbiorów<sup>2</sup>.

Natomiast w przypadku źródeł pracujących (mogących pracować) w ciągu doby ze stałą mocą, np. elektrownie biogazowe, biomasowe czy na paliwa ciekłe, maksymalne zmniejszenie się strat energii wystąpi w przypadku pracy źródeł z mocą zbliżoną do średniej ważonej obciążenia maksymalnego i minimalnego. Dla uproszczenia można przyjąć tu średnią arytmetyczną obciążenia minimalnego i maksymalnego.

## 5. PODSUMOWANIE

Wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną ponad możliwości transformatora sieciowego w danej sieci może być realizowany przez wymianę lub dodanie transformatora sieciowego WN/SN (lub SN/nN) lub przez instalowanie w tej sieci źródeł energii.

<sup>2</sup> Powyższe stwierdzenia są prawdziwe przy przyjętych założeniach. Ze względu na występującą w rzeczywistości zmienność obciążeń, jak i zmienność generacji źródeł niespokojnych, należy je traktować jako pewne przybliżenie.

Instalowanie źródeł energii w sieci może być realizowane do poziomu wynikającego z zależności przedstawionych w rozdziale 2. Nie jest wówczas wymagana wymiana transformatora sieciowego. Zależności określające maksymalne wartości mocy źródeł, jakie mogą być przyłączane w węzłach sieci, odnoszą się do stanu braku aktywnego oddziaływania operatora systemu dystrybucyjnego na sieć (w tym na źródła). Dla operatora systemu jest to stan wygodny, ponieważ nie angażuje go w aktywne oddziaływanie na system, czy to przez bezpośrednie sterowanie źródłami, czy to poprzez usługi systemowe.

W sytuacji przyłączania źródła (źródeł) tylko w głębi sieci, tj. w węzłach od 2 do  $N$ , wzrost zapotrzebowania na energię w danej sieci bez konieczności wymiany transformatora sieciowego na większy lub budowy nowego węzła do zasilania tej sieci jest możliwy do poziomu równego sumie maksymalnych obciążeń istniejących gałęzi 1–2, tj. pierwszych odcinków istniejącej sieci. Wzrost ten nie może być większy od sumy mocy źródeł przyłączonych do tej sieci.

Natomiast po przyłączeniu źródła (źródeł) do szyn rozdzielni po stronie dolnego napięcia transformatora sieciowego możliwe jest zwiększenie mocy źródła (źródeł) energii elektrycznej, przy założeniu braku modyfikacji istniejącej infrastruktury sieciowej, do poziomu ograniczonego przez:

- obciążalność dopuszczalną długotrwale i zwarciovą rozdzielnic
- wytrzymałość zwarciovą istniejącej aparatury łączeniowej oraz linii przesyłowych (kabli lub przewodów linii napowietrznych).

Warto zaznaczyć, że rozbudowa sieci (linii) jako wynik wzrostu zapotrzebowania może spowodować wzrost mocy źródeł, jakie mogą być zainstalowane w danej sieci bez konieczności realizacji inwestycji sieciowych, a przyłączanych według zasady: *przyłącz i zapomnij* oraz *przyłącz, steruj lokalnie i zapomnij*.

Dalszy wzrost zapotrzebowania w danej sieci wymaga rozbudowy węzła zasilającego lub dalszego zwiększenia mocy źródeł przyłączonych do danej sieci. Zwiększenie mocy źródeł, przy zachowaniu istniejącego transformatora sieciowego WN/SN (lub SN/nN), jest w istocie realizacją *idei zastępowalności inwestycji sieciowej usługą systemową*. Jest to wówczas przyłączenie źródła typu: *przyłącz i aktywnie steruj*, gdzie to sterowanie może być realizowane nie tylko *on-line*, ale musi mieć postać usługi systemowej<sup>3</sup>. Dlaczego? Dlatego, że najistotniejszym wymogiem do spełnienia przez źródło energii elektrycznej jest jego zdolność do bezprzerwowej (pewnej) pracy w zdefiniowanych okresach czasu. Wymaga się tu, tj. gdy moc maksymalna pobierana przez odbiory przekroczy moc znamionową transformatora zasilającego sieć (abstrahując od możliwości okresowego przeciążenia transformatora), pewności pracy większej niż pewność pracy dużych jednostek wytwórczych w systemie przesyłowym. Wynika to z braku możliwości rezerwowania tak ułożonego źródła. Tę zdolność rezerwowania można jednak uzyskać i to na różne sposoby. Jako sposób podstawowy należy uznać wykorzystanie odpowiednio dużej liczby jednostek wytwórczych w danej sieci jako źródeł podlegających sterowaniu operatorskiemu.

Niezawodność dostawy energii powinna być elementem umowy pomiędzy prosumentem (właścicielem źródła energii będącym równocześnie odbiorcą energii, tj. producentem i konsumentem) a operatorem sieci.

Niezawodność dostawy energii można również zwiększyć, wykorzystując technologie zasobnikowe. Mogą być one ulokowane u prosumenta, producenta lub konsumenta. Z punktu widzenia pracy sieci oraz zależności przedstawionych w rozdziale 2, lokalizacja zasobników energii nie ma znaczenia. Z punktu widzenia jakości sterowania i kosztu systemu sterowania może znaczenie mieć. Energia, jaką może gromadzić zasobnik energii, koryguje moc minimalną, jaka może być pobierana w węzle sieci, tj. wielkość  $S_{m0,i}$ . Zastosowanie zasobników energii powiększające wartość mocy minimalnej, pobieranej w węzle, zwiększa moc źródeł, jakie mogą być przyłączone do danej sieci.

Ciężar sterowania siecią może być przeniesiony lub częściowo przeniesiony na źródło energii, tj. na prosumenta. Sterowanie to może być realizowane tylko poprzez odpowiednie zdefiniowanie charakterystyk wybranych układów regulacji jednostki wytwórczej prosumenta lub poprzez zdefiniowanie tych charakterystyk oraz jednoczesne oddziaływanie typu *on-line* na wybrane obiekty danej sieci przez operatora sieci. W powyższych procesach regulacyjnych mogą być, i będą, wykorzystywane technologie sieci typu *smart grid*.

Elementem, który może w przyszłości w istotny sposób wpłynąć na pracę sieci tego typu będzie system DSM (*demand side management*), gdzie w stanach awaryjnych sieci działanie powinno koncentrować się na ograniczaniu mocy pobieranej, natomiast w normalnych stanach pracy sieci na „spłaszczaniu” krzywej obciąż-

3 Usługi tego typu w sieciach rozdzielczych, ze względów legislacyjnych, nie są obecnie realizowane.



żenia. Działania mające na celu spłaszczenie krzywej obciążenia mogą mieć charakter aktywny, tj. formę bezpośredniego sterowania odbiorami u konsumenta energii (np. włącz poza szczytem obciążenia), lub charakter pasywny, np. mający formę oddziaływania na konsumenta taryfami.

Podsumowując powyższe, można stwierdzić, że pytanie wynikające z tytułu artykułu: wykorzystywać sieci elektroenergetyczne w sposób maksymalny czy w stopniu minimalizującym straty energii, pozostaje nadal otwarte. Odpowiedzi na nie może udzielić analiza ekonomiczna, uwzględniająca koszty rozbudowy sieci, a w tym koszty uniknięte tej rozbudowy.

Pewnikiem jest natomiast, że w istniejących sieciach elektroenergetycznych przyłączenie źródeł generacji rozproszonej, odpowiednio co do lokalizacji oraz o odpowiedniej mocy znamionowej, będzie prowadziło do obniżenia strat mocy i energii elektrycznej. Tym samym będzie mogło przynosić spółkom dystrybucyjnym pewne korzyści finansowe. Można również stwierdzić, że etap rozwoju sieci rozdzielczych, polegający na maksymalizacji ich wykorzystania (jako wynik nasycania sieci generacją rozproszoną), poprzedzony zostanie etapem minimalizacji strat energii (jako wynik ograniczonego nasycenia generacją rozproszoną).

## BIBLIOGRAFIA

1. Kulczycki J., Rudziński M., Straty energii jako nieodzowne potrzeby własne sieci, *Acta Energetica* 01/2009.
2. Tomczykowski J., Frąckowiak R., Gałan T., Przebiegi obciążeń odbiorców typu gospodarstwa domowe, Konferencja *Aktualne Problemy w Elektroenergetyce APE '09*, Jurata 3–5 czerwca 2009.
3. Kot A., Kulczycki J., Szpyra W.K., Możliwość redukcji strat w sieciach dystrybucyjnych średniego napięcia poprzez optymalną lokalizację rozcięć, *Acta Energetica* 02/2009.