

ZADANIE OPTYMALNEJ KOMPENSACJI MOCY BIERNEJ W SIECIACH ROZDZIELCZYCH ŚREDNIEGO NAPIĘCIA – KRÓTKA CHARAKTERTYSTKA ROZWIĄZAŃ

Waldemar SZPYRA¹, Wojciech BĄCHOREK², Aleksander KOT³

AGH Akademia Górniczo – Hutnicza, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

1. tel.: 12 617 3247; e-mail: wszpyra@agh.edu.pl

2. tel.: 12 617 2599; e-mail: wojbach@agh.edu.pl

3. tel.: 12 617 4066; e-mail: akot@agh.edu.pl

Streszczenie: Referat poświęcony jest problematyce optymalnego rozmieszczenia źródeł mocy biernej w otwartych sieciach rozdzielczych średniego napięcia (SN). W referacie sformułowano zadanie optymalizacji wraz z warunkami ograniczającymi oraz wskazano metody jego rozwiązania. Omówiono dane niezbędne do wykonania obliczeń oraz przyjmowane założenia. Dokonano obliczeń optymalizacyjnych dla szeregu rzeczywistych sieci SN, których podstawowe dane wraz z charakterystykami uzyskanych rozwiązań zaprezentowano w referacie. Pracę kończy podsumowanie zawierające wnioski z wykonanych analiz.

Słowa kluczowe: elektroenergetycznie sieci rozdzielcze, kompensacja mocy biernej, optymalizacja.

1. WPROWADZENIE

W ostatnich latach wyraźnie zarysowują się tendencje do poszukiwania rozwiązań służących poprawie efektywności oraz wspierających ochronę środowiska w wielu obszarach i dziedzinach życia. Dotyczy to także, a może w szczególności sektora elektroenergetyki. Redukcja strat oraz poprawa sprawności sieci rozdzielczych znajdują się na czele strategii przedsiębiorstw sieciowych – Operatorów Systemów Dystrybucyjnych (OSD).

Jednym ze sposobów redukcji strat mocy i energii jest stosowanie kompensacji mocy biernej. Z badań i analiz przeprowadzonych przez Autorów wynika, że powszechnie stosowane w praktyce krajowej systemy kompensacji w sieciach rozdzielczych (kompensacja centralna w głównych punktach zasilania (GPZ) i kompensacja biegu jałowego w stacjach SN/nn) przeważnie charakteryzują się niską efektywnością ekonomiczną [1, 2, 3].

Skłania to do sformułowania zadania optymalizacji, które byłoby zorientowane na dostarczanie rozwiązań charakteryzujących się wysoką efektywnością ekonomiczną z punktu widzenia OSD.

Mając powyższe na uwadze przyjęto dla proponowanego systemu kompensacji:

- stosowanie kondensatorów po stronie niskiego napięcia – kompensowanie tej samej mocy biernej jest znacznie tańsze po stronie niskiego niż średniego napięcia,
- instalację kondensatorów o relatywnie większych mocach w wybranych, nielicznych stacjach SN/nn – obniża to jednostkowy koszt kompensacji,
- zastosowanie kondensatorów załączonych na stałe oraz okresowo (przy wykorzystaniu styczników sterowanych zegarami) – co pozwala na wykorzystanie potencjału

kompensacji przy zmiennych przebiegach zapotrzebowania mocy biernej.

2. ZADANIE OPTYMALIZACJI

Zadanie optymalizacji sprowadza się do wyboru takich lokalizacji (stacji SN/nn) kondensatorów oraz określenia ich mocy, przy których zysk, określony jako różnica pomiędzy oszczędnościami wynikającymi z ograniczenia strat mocy i energii O_A , a kosztami kompensacji K_A , osiąga wartość maksymalną:

$$\max: Z_A = O_A - K_A \quad (1)$$

Zakłada się, że w sieci z przyłączonymi kondensatorami:

- nie są przekroczone wartości dopuszczalne w zakresie obciążalności prądowej elementów sieci oraz wartości poziomów napięć w jej węzłach,
- łączna moc kondensatorów przyłączonych na stałe nie przekracza minimalnej wartości mocy biernej dostarczonej z sieci wysokiego napięcia (WN),
- łączna moc wszystkich kondensatorów (przyłączonych na stałe i załączanych okresowo) nie przekracza minimalnej mocy pobieranej z sieci WN w założonym czasie pracy załączenia kondensatorów.

Do obliczeń optymalizacyjnych zastosowano dedykowany program stworzony przez Autorów. Został on opracowany na bazie metody wyznaczania kosztów i efektów kompensacji mocy biernej przedstawionej w [1, 4]. Program realizuje dwa algorytmy wyboru optymalnej mocy i lokalizacji kondensatorów w sieci: heurystyczny oraz ewolucyjny. Optymalizowaną funkcją celu może być osiągany w ciągu roku zysk lub roczne ograniczenie strat energii czynnej [5].

3. DANE I ZAŁOŻENIA

Zestaw danych niezbędnych do wykonania obliczeń obejmuje:

- zbiór danych opisujących strukturę i parametry analizowanej sieci rozdzielczej SN,
- zbiór danych pomiarowych o przebiegach zapotrzebowania na moc czynną i bierną analizowanej sieci rozdzielczej SN,
- zbiór parametrów zawierających wskaźniki makroekonomiczne, wskaźnik kosztowe oraz ceny urządzeń do kompensacji.

Przyjęto, że w proponowanym systemie kompensacji zostaną wykorzystane kondensatory niskiego napięcia których parametry przedstawiono w tabeli 1.

Obliczenia wykonuje się przy następujących założeniach:

- napięcie zasilające sieć jest równe średniej z rocznych wartości napięcia,
- czas pracy kondensatorów przyłączonych na stałe jest równy liczbie godzin w roku (8760 h),
- czas pracy kondensatorów ze stycznikami jest dla wszystkich kondensatorów jednakowy (kondensatory są załączane i wyłączane jednocześnie we wszystkich stacjach),
- stopień obciążenia transformatorów zasilanych z danego obwodu jest w poszczególnych interwałach czasu taki sam dla wszystkich transformatorów,
- stosunek energii biernej do energii czynnej odbieranej poszczególnych transformatorów SN/nn zasilanych z danego obwodu jest w poszczególnych interwałach czasu taki sam dla wszystkich transformatorów i jest równy stosunkowi energii biernej do energii czynnej wpływającej do tego obwodu w odpowiednich interwałach.

Dwa ostatnie założenia (d i e) są potrzebne tylko wtedy, gdy nie dysponujemy danymi o mocach pobieranych z poszczególnych stacji transformatorowych SN/nn.

Tabela 1. Ceny stosowanych kondensatorów

Moc znamionowa [kvar]	Cena kondensatorów przyłączanych na stałe [zł/szt.]	Cena kondensatorów ze stycznikami [zł/szt.]
7,5	193	593
10	193	618
12,5	193	633
15	240	710
18,3	275	765
20	275	845
25	490	1080
30	490	1120

4. CHARAKTERYSTYKA OBIEKTÓW

Dla zadania optymalizacji kompensacji mocy biernej w sieci rozdzielczej SN obiektem jest rzeczywista sieć dystrybucyjna zasilana z jednej stacji transformatorowej 110 kV/SN (z jednego GPZ).

Dysponując szczegółowymi danymi o sieciach SN oraz rocznych przepływach energii dla 9 stacji transformatorowych 110 kV/SN zlokalizowanych w różnych częściach Polski przystąpiono do budowy modeli niezbędnych dla realizacji obliczeń optymalizacyjnych.

Sieci SN zasilane z analizowanych stacji są mocno zróżnicowane. Liczba linii SN zawiera się w przedziale od 4 do 26, długość sieci SN od 13 do 797 km, a liczba zasilanych stacji SN/nn od 17 do 595 sztuk.

Dla tych obiektów przeprowadzono obliczenia optymalizacji kompensacji mocy biernej z zastosowaniem obu algorytmów: heurystycznego oraz ewolucyjnego.

5. WYNIKI OBLICZEŃ

Z uwagi na objętość niniejszego referatu zaprezentowanie pełnych wyników obejmujących szczegółowe lokalizacje kondensatorów w poszczególnych sieciach SN nie jest możliwe i nie byłoby celowe. Zdecydowano się na przedstawie-

nie zbiorczych informacji dla każdego obiektu obejmujących charakterystyki techniczne oraz wskaźniki ekonomiczne uzyskanych rozwiązań.

Tabela 2 zawiera informacje charakteryzujące uzyskane rozwiązania dla wszystkich 9 obiektów. Prezentowane warianty rozwiązań dotyczą zastosowanych typów kondensatorów, odpowiednio: F – tylko kondensatory załączone na stałe, S – tylko kondensatory załączane stycznikami, F+S – rozwiązania z użyciem obu typów kondensatorów. Wszystkie przedstawione w tabeli 3 wyniki zostały uzyskane przy użyciu algorytmu heurystycznego.

Czas obliczeń dla algorytmu heurystycznego zawierał się w przedziale od kilku do kilkudziesięciu minut w zależności od wielkości obiektu. Dla tych samych obiektów jeden przebieg algorytmu ewolucyjnego zajmował od kilku do kilkudziesięciu godzin. Czasy te stanowią wykładnię złożoności obliczeniowej problemu optymalnego rozmieszczenia źródeł mocy biernej w rzeczywistych sieciach otwartych.

6. WNIOSKI

Oba opracowane algorytmy umożliwiają rozwiązanie problemu optymalnego rozmieszczenia źródeł mocy biernej dla rzeczywiście występujących wymiarów zadania. Obliczenia z użyciem algorytmu ewolucyjnego są znacznie bardziej czasochłonne lecz pozwalają na uzyskanie – w niektórych przypadkach – rozwiązań o kilka procent lepszych od rozwiązań uzyskanych metodą heurystyczną.

Na podstawie analizy wyników dla obiektów rzeczywistych zestawionych w tabeli 3 można sformułować następujące wnioski:

- Kompensacja mocy biernej przy wykorzystaniu odpowiednio zwymiarowanych i rozlokowanych kondensatorów nn może być efektywnym sposobem ograniczania strat energii w sieci SN;
- Efektywność takiej kompensacji zależy przede wszystkim od:
 - rozległości, rodzaju budowy i przekrojów przewodów sieci zasilanej z danego GPZ,
 - ilości energii biernej w ciągu roku pobieranej przez tą sieć,
 - obecności składowej stałej w rocznym przebiegu zapotrzebowania na moc bierną;
- Najbardziej efektywna z ekonomicznego punktu widzenia jest kompensacja przy użyciu wyłącznie kondensatorów załączonych na stałe;
- Rozwiązania charakteryzujące się maksymalnym zyskiem z ograniczenia strat energii nie są najbardziej efektywne z ekonomicznego punktu widzenia. Przyrost nakładów inwestycyjnych na zainstalowanie kondensatorów pracujących okresowo jest znacznie większy niż przyrost zysku wynikającego z ich zainstalowania;
- Analiza wskaźników efektywności ekonomicznej dla uzyskanych rozwiązań pozwala podzielić badane objekty na takie, w których:
 - kompensacja jest nieopłacalna (obiekty D, F oraz G),
 - kompensacja jest bardzo efektywna (obiekty A, H oraz I),
 - kompensacja opłaca się – pozostałe objekty.

Tabela 2. Zbioreze informacje charakteryzujące uzyskane rozwiązania zadania optymalizacji kompensacji mocy biernej dla 9 obiektów

Wyszczególnienie	Symbol [jednostka]	GPZ A		GPZ B		GPZ C		GPZ D		GPZ E		GPZ F		GPZ G		GPZ H		GPZ I	
		F + S	F	F + S	F	S	S	S	S	S	S	S	S	S	F + S	F	F + S	F	F + S
Ilość energii biernej pobieranej w ciągu roku	E_r [Mvarh/rok]	38 305	33 398*	9 558	9 421*	7 166	7 166*	25 015	3 820*	29 082	29 076*	5 979	4 059*	13 795	13 757*	5 207	3 995*	23 293	23 293*
Ilość energii biernej pobieranej w czasie $T_w = 7000$ godz.	E_{r7000} [Mvarh]	34 197		8 676		6 490		24 603		27 477		5 763		12 583		5 107		21 199	
Ograniczenie mocy kondensatorów przyłączonych na stałe	$\text{Max } Q_F$ [kvar]	820	820	109	109	0	0	0	0	0	0	0	0	500	500	8	8	258	258
Ograniczenie mocy wszystkich kondensatorów	$\text{Max } Q_{FS}$ [kvar]	2 890	820	654	109	483	700	700	700	1570	389	389	389	1090	500	255	255	1547	258
Liczba kondensatorów przyłączonych na stałe	n_{st} [szt.]	37	37	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	24	24	0	0	6	6
Moc znamionowa kondensatorów przyłączonych na stałe	Q_{st} [kvar]	902,5	902,5	115	115	0	0	0	0	0	0	0	0	535	535	0	0	270	270
Nakłady inwestycyjne na kondensatory przyłączone na stałe	K_{st} [zł]	10 833	10 833	1 191	1 191	0	0	0	0	0	0	0	0	6 679	6 679	0	0	2 678	2 678
Liczba kondensatorów załączanych okresowo	n_{ok} [szt.]	27	-	16	-	6	1	1	1	45	1	1	1	3	-	5	3	13	-
Moc znamionowa kondensatorów załączanych okresowo	Q_{ok} [kvar]	945	-	585	-	205	50	50	50	1680	50	50	50	130	-	250	130	550	-
Nakłady inwestycyjne na kondensatory załączane okresowo	K_{ok} [zł]	26 716	-	16 019	-	5 851	1 222	1 222	1 222	45 880	1 222	1 222	1 222	3 380	-	6 110	3 380	14 176	-
Całkowite nakłady inwestycyjne	K_I [zł]	37 549	10 833	17 210	1 191	5 851	1 222	1 222	1 222	45 880	1 222	1 222	1 222	10 059	6 679	6 110	10 059	16 854	2 678
Roczne ograniczenie strat energii czynnej	δE_a [kWh/rok]	176992	150098	34 962	11 645	20 332	915	915	915	101 472	839	839	839	67 032	64 589	5677	67 032	42 587	21 756
Roczny zysk wynikający z kompensacji mocy biernej	Z_r [zł/rok]	43 104	40 368	6 698	3 050	4 640	24,63	24,63	24,63	20 880	7,21	7,21	7,21	16 696	16 632	640	16 696	9 362	5 787
Wskaźnik wartości zaktualizowanej netto	NPV/R [zł/zł]	7,70	25,00	2,61	17,18	5,32	0,14	0,14	0,14	3,05	0,04	0,04	0,04	11,14	16,71	0,70	11,14	3,73	14,50
Stopa zwrotu nakładów inwestycyjnych	P [%]	22,65	37,98	10,08	32,89	18,19	-	-	-	11,81	-	-	-	27,26	32,52	-	27,26	14,06	30,66
Jednostkowy koszt ograniczenia strat energii	k_{ogw} [zł/kWh]	0,0421	0,0146	0,0976	0,0213	0,0567	0,2641	0,2641	0,2641	0,0892	0,2880	0,2880	0,2880	0,0298	0,0206	0,2129	0,0298	0,0790	0,0258
Dyskontowany okres zwrotu nakładów inwestycyjnych	DPP [lat]	0,80	0,24	2,52	0,35	1,18	nigdy!	nigdy!	nigdy!	2,12	nigdy!	nigdy!	nigdy!	0,55	0,36	13,83	0,55	1,71	0,42

Oznaczenia: F – tylko kondensatory przyłączone na stałe; S – tylko kondensatory ze stycznikami; F + S – rozwiązanie z użyciem obu typów kondensatorów;

* – ilość energii biernej pobieranej przez linie SN objęte obliczeniami optymalizacyjnymi.

Ze względu na przyjęte założenia odnośnie rozplywu energii biernej w analizowanych sieciach (założenia (d) i (e) podane w podrozdziale dotyczącym danych i założeń) uzyskane wyniki należy traktować jako orientacyjne. Decyzje o zabudowie systemu kompensacji powinny być poprzedzone weryfikacją rozplywu energii biernej w sieci.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Kot A., Nowak W., Szpyra W., Tarko R.: Efficiency improvement of reactive power compensation in power distribution networks, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2013 R.89 nr 6, ISSN 0033-2097, s. 190–195.
2. Szpyra W., Nowak W., Moskwa Sz., Tarko R., Bąchorek W., Benesz M.: Efektywność kompensacji mocy biernej w sieciach

dystrybucyjnych, materiały konferencyjne APE'11, Gdańsk 2011.

3. Szpyra W.: Efektywność kompensacji mocy biernej stanu jałowego transformatorów SN/nn, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2011 R.87 nr 2, ISSN 0033-2097, s. 144-146.
4. Szpyra W., Bąchorek W., Kot A., Nowak W., Tarko R.: Wyniki optymalizacji kompensacji mocy biernej w sieciach elektroenergetycznych, III Konferencja Naukowo-Techniczna - Problematyka mocy biernej w sieciach dystrybucyjnych i przesyłowych, Wisła 2014 r.
5. Szpyra W., Bąchorek W., Kot A., Makuch A.: Kryteria optymalnej kompensacji mocy biernej w sieciach dystrybucyjnych, materiały konferencyjne APE'13, Gdańsk 2013.

OPTIMAL REACTIVE POWER COMPENSATION IN MEDIUM VOLTAGE NETWORKS – SHORT SOLUTIONS CHARACTERISTIC

The paper addresses the problem of optimal reactive power compensation in a distribution network. In general, the optimal solution to reactive power compensation problem relies upon finding the location, size of capacitors and their working time at which the adopted objective function reaches its extreme. The method proposed in this paper maximizes the profit resulting from the reduction of network losses. Additionally, the optimal solution should meet specified constraints. The constraints include: maintaining voltage levels within acceptable limits, not overloading network elements, and limiting the power of capacitors to prevent overcompensation. As a measure of the economic efficiency of solutions the net present value ratio (NPVR) was assumed. The NPVR cannot be used as an objective function because the addition of next capacitor decreases the value of NPVR in the iterative process. We developed two optimization algorithms for solving the task: heuristic and evolutionary. This paper presents selected results of numerical studies for 9 real polish distribution networks fed by a 110/15 kV transformer.

Keywords: power distribution networks, reactive power compensation, optimization