

КОМПЛЕКСНА ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗПОДІЛУ РЕАКТИВНИХ ПОТУЖНОСТЕЙ ТА КОЕФІЦІЄНТІВ ТРАНСФОРМАЦІЇ. КОМП'ЮТЕРНИЙ КОМПЛЕКС ОРТИМ_QT

Банін Д.Б., к.т.н., доцент, Прилипко Д.Ю., магістрант, Лепський М.Г., магістрант

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації енергосистем

Вступ. Ефективне керування режимами електричних мереж різного ієрархічного підпорядкування в електроенергетиці України – магістральними мережами енергосистеми (ЕС), розподільчими мережами електропередавальних організацій (ЕО) і технологічними мережами споживачів електроенергії (СЕ) безпосередньо пов'язане з реалізацією в цих мережах компенсації потоків (перетікань) реактивної потужності (КРП) з метою зниження технічних втрат активної потужності та забезпечення нормального (припустимого) рівня напруг згідно з нормативними вимогами щодо якості електроенергії [1].

Мета роботи та постановка задачі. Ціллю роботи являється модернізація комплексу ОРТИМ_QT та системна контрольна перевірка його технологічних можливостей. Математичне забезпечення комплексу повинно базуватись на трьох нових методичних напрямках:

1. Вирішення оптимізаційних систем рівнянь на основі матриці Гесе, з урахуванням обмежень за методом невизначених множників Лагранжа, при використанні розріджених форм матриць та оптимальних алгоритмів подвійної факторизації.

2. Реалізація розрахунків усталеного режиму методом Ньютона з фіксацією модулів напруги та алгоритмом регульованого врахування обмежень по реактивній потужності.

3. Автоматичне формування бар'єрних функцій для технологічних та режимних обмежень, формування інтегральних лімітних умов [2].

Визначимо основні пункти, згідно яких виконуються оптимізаційні розрахунки мереж енергосистеми електропередавальних організацій та промислових споживачів [3]:

1. Практична оптимізація режимів реальних мереж ЕО, ЕС виконується без методичних спрощень: не використовуються номінальні напруги, не використовуються приведення параметрів схем до одного базового рівня напруги, забороняється «еквівалентне» розімкнення замкнених транзитів 110 кВ, економічні еквіваленти реактивної потужності (ЕЕРП) розраховуються згідно [4], коефіцієнти трансформації відповідають РПН і ПБЗ в схемах ЕО тощо.

2. Враховуються можливі рівні компенсації реактивних потужностей (навантажувальна, споживча, нульова та системна). Тут реалізується технологічна взаємодія з промисловими споживачами активної та реактивної потужності. В першому випадку оптимізуєма реактивна потужність $Q_{\text{опт}}$ компенсуючого пристрою споживача (КП) обмежується величиною заданого реактивного навантаження, в другому додатково враховуються втрати в

живлячому трансформаторі, в третьому забезпечується нульовий перетік реактивної потужності на межі балансового розділу електричних мереж споживача та ЕО, в четвертому рівень генерації (споживання) повинен забезпечити, насамперед, підтримку наближених режимних характеристик до оптимального режиму по реактивній потужності та напрузі в електричній мережі ЕО [5].

3. Комплексна система компенсації перетікань реактивної потужності в мережах виконується з вибором оптимальних регулювальних відгалужень РПН трансформаторів, що знімає «бар'єр високих напруг», пов'язаний з генерацією $Q_{\text{опт}}$. Компенсуюча реактивна потужність підвищує напругу, а РПН трансформаторів понижують до допустимого ефективного значення. В прийнятій методології оптимізації введений елемент КСК [6]. В склад елементу КСК входить вузловий компенсуючий пристрій ($Q_{\text{КП}}$), регульований РПН коефіцієнт трансформації трансформатора, що живить цей вузол безпосередньо, і регульований коефіцієнт трансформації зустрічної дії.

4. Критерієм електричної віддаленості вузла розрахункової схеми від джерел реактивної потужності є режимна характеристика – економічний еквівалент реактивної потужності ЕЕРП. Значення ЕЕРП, розраховані для всіх вузлів схеми, дозволяють формалізувати вибір місць установа КП і рекомендувати економічно доцільну черговість введення їх в експлуатацію. Чисельно ЕЕРП дорівнює першій частковій похідній сумарних втрат активної потужності електричної мережі по реактивній потужності конкретного вузла $\text{ЕЕРП} = \partial \Delta P / \partial Q_i$. Визначення глобального мінімуму ($\text{ЕЕРП}_i = 0$) і відповідних йому обсягів $Q_{\text{КП}}$ має суто теоретичний сенс, оскільки, як правило, це рішення не є економічно доцільним. Крім того, при врахуванні обмежень отримати глобальний оптимум неможливо. Практично доцільне значення ЕЕРП, яке забезпечує реальний термін окупності, знаходиться в межах $0.025 \div 0.05$.

5. Оптимальний режим, який отримано в результаті вибору місць установа КП і завантажений оптимальними значеннями $Q_{\text{КП}}$, повинен знаходитись у припустимій області, тобто повинні виконуватись технологічні, режимні та економічні обмеження. До технологічних обмежень відносяться припустимі границі регуляторів режиму – реактивна потужність КП ($Q_{\text{КП}}$) і коефіцієнт трансформатора (K_T), тобто повинні виконуватись умови $Q_{\text{min}} \leq Q_{\text{КУ}} \leq Q_{\text{max}}$, $K_{\text{min}} \leq K_{\text{КУ}} \leq K_{\text{max}}$. До технологічних обмежень також відносять розглянуті вище умови по рівням компенсації $Q_{\text{КУ}} \leq Q_{\text{Н}}$ (навантажувальна), $Q_{\text{КУ}} \leq Q_{\text{Н}} + dQ_{\text{ТР}}$ (споживач), $Q_{\text{КУ}} \leq Q_{\text{Н}} + Q_{\text{Т}} + dQ_{\text{ТР}}$ (нульова, тут $Q_{\text{Т}}$ – транзитна потужність підстанції споживача). Відмітимо, що ці обмеження визначаються автоматично при розрахунку режиму та оптимізації. До режимних обмежень відносяться обмеження за припустимими рівнями напруги та припустимому завантаженню трансформаторів і ліній, тобто повинні виконуватись умови $U_{\text{min}} \leq U \leq U_{\text{max}}$, $S_{\text{ТР}} \leq S_{\text{доп}}$, $I_{\text{Л}} \leq I_{\text{доп}}$. В першу чергу ці обмеження забезпечуються елементами КСК, але контролюється і реалізовано виконання режимних обмежень для всіх вузлів схеми, наприклад, за рахунок регулювання системними трансформаторами. До економічних обмежень включено два параметри – заданий рівень капітальних вкладень і бажаний термін окупності.

Матеріали та результати досліджень. Рішення оптимізаційних систем рівнянь високого порядку на основі матриці Гесе при великій кількості регуляторів становиться менш ефективним, ніж метод координатного спуску другого порядку, задіяний паралельно в комплексі ОРТИМ_QT. Тут на кожному кроці по координаті Q_i (K_{Ti}) обчислюється розмір кроку за формулами (1), (2):

$$Q_{min} \leq \Delta Q_i = -\frac{\partial \Delta P}{\partial Q_i} : \frac{\partial^2 \Delta P^2}{\partial Q_i^2} \leq Q_{max}, \quad (1)$$

$$K_{Tmin} \leq \Delta K_{Ti} = -\frac{\partial \Delta P}{\partial K_{Ti}} : \frac{\partial^2 \Delta P^2}{\partial K_{Ti}^2} \leq K_{Tmax}. \quad (2)$$

Відмітимо, що дотримується врахування дискретності аргументів Q_i та K_{Ti} . Крок ΔQ (ΔK_T) може демпфуватися і весь процес координатного спуску відповідає алгоритму Зейделя. В координатному спуску достатньо просто реалізується врахування всього спектру обмежень на основі методу бар'єрних функцій, оскільки вони задіяні безпосередньо в момент кроку по координаті. «Конкуренцію» цьому методу може скласти рішення системи на основі матриці Гесе тільки у випадку її слабозаповненості. Однак, для замкнутих мереж чи розімкнутих з одним балансуєчим вузлом друга часткова похідна між i -тим та j -тим регуляторами, як правило, не дорівнює нулю, збільшуючи рівень заповненості (3).

$$\frac{\partial^2 \Delta P}{\partial Q_i \partial Q_j} \neq 0. \quad (3)$$

Проте, чисельна величина цієї похідної може змінюватися в достатньо широких межах та бути значно меншою діагональних елементів матриці Гесе (4), (5).

$$\frac{\partial^2 \Delta P}{\partial Q_i \partial Q_j} \ll \frac{\partial^2 \Delta P}{\partial Q_i^2}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 \Delta P}{\partial Q_j \partial Q_i} \ll \frac{\partial^2 \Delta P}{\partial Q_j^2} \partial Q_j^2. \quad (5)$$

В цьому випадку існує можливість прирівняти її нулю. В якості критерію для алгоритмічної реалізації може бути запропоновано вирази (6), (7), (8):

$$|D_{ii}| > Kof |D_{ij}|, \quad (6)$$

$$|D_{ii}| = -\frac{\partial \Delta P}{\partial Q_i} : \frac{\partial^2 \Delta P^2}{\partial Q_i^2}, \quad (7)$$

$$|D_{ij}| = \left(-\frac{\partial^2 \Delta P}{\partial Q_i \partial Q_j} : \frac{\partial^2 \Delta P}{\partial Q_i^2} \right) * \Delta Q_{jOPT}, \quad (8)$$

де:

D_{ii} – крок по координаті Q_i , відповідний координатному спуску 2-го порядку;

D_{ij} – побічний вплив другої часткової похідної;

Kof – коефіцієнт зовнішнього регулювання. При $Kof = 0$ всі недиагональні елементи матриці Гесе приймають значення 0, перетворюючи її в діагональну. В інших варіантах матриця Гесе перетворюється у розріджену з різним рівнем заповненості.

В роботі проводився дослідження ефективності розглянутого критерію.

На рис.1 представлена розрахункова схема контрольного прикладу з результатами комплексної оптимізації. В якості регуляторів робочого режиму обрані комплексні елементи:

- вузол 7 з трьома трансформаторами 10/0.4 (паралельні гілки 5-7);
- вузол 8 з трансформатором 35/0.4 (гілка 6-8);
- вузол 37 з трансформатором 35/10 (36-37);
- вузол 26 з трансформатором 10/0.4 (25-26);
- вузол 32 з трансформатором 35/10 (31-32).

Регулятори 7, 37, 26, 32 обрані автоматично за алгоритмом аналізу ЕЕРП, а вузол 8 ввімкнено примусово з вимогою забезпеченням нульового перетоку на ВН трансформатора 6-8.

Рівень заповненості матриці Гесе для даної схеми і складу регуляторів наведено на рис.2. Наведені вектор градієнт і крок оптимального приросту. Наприклад, для вузла 7 (перший рядок системи рівнянь) маємо (9):

$$(-0.0980 + (0.0022 \cdot 3.0862 + 0.0025 \cdot 4.7014)) / 0.0288 = -2.8331 \quad (9)$$

Тут матриця Гесе слабозаповнена через наявність декількох балансуючих вузлів, не пов'язаних транзитними лініями, які на схемі відключені (гілки 10-23, 11-3)

Числові результати процесу оптимізації приведені в форматі комплексу ОРТИМ_QT на рис.3. За результатами зазначимо наступне:

1) встановлено в сумі 15.07 МВар. При цьому втрати зменшуються на 16.2%. Частка втрат від перетікань реактивної потужності зменшилась з 27.2% у вихідному режимі до 14.8% в оптимальному;

2) в оптимальному режимі рівні напруг знаходяться в допустимій області (-5% ÷ +10%). Перевантаження трансформаторів відсутні;

3) для забезпечення оптимального режиму в допустимій області під'єднанні трансформатори зустрічного регулювання та системні трансформатори. На схемі (рис.1.) вони позначені буквами V та W. Це трансформатори 10-103, 1-101, 1-102, 3-4, 23-24. Оптимальні значення відгалужень $Notv$ вказані в таблиці (рис. 3);

4) термін окупності (Timeokup) відповідно економічним показникам: ціна компенсуючого пристрою ($S_{ку}$), питомих втрат КП ($DP_{ку}$), тариф на активну електроенергію (tarif), кількість годин максимальних втрат ($T_{ау}$) та ін. – складають 26.2 місяця;

G		1	2	3	4	5	ΔQ		g	
7	1	0.029	0.002	0	0	0.003	-2.8331		0.0980	
8	2	0.002	0.016	0	0	0.008	-3.0862		0.0862	
26	3	0	0	0.056	0	0	-1.3252	=	-	0.0743
32	4	0	0	0	0.01	0	-4.7014			0.0448
37	5	0.003	0.008	0	0	0.023	-3.8134			0.1218
Nвузла		7	8	26	32	37				

Рисунок 2 – Заповненість матриці Гесе контрольного прикладу

vvvvv

PROCESS

F0 = 4.568(1.24)[MBt] t.e. 27.17 % !!
 FY = 3.828(0.57)[MBt] t.e. 14.78 % !!
 DDP= -0.740 [MBt] t.e. 16.19 %

N	Name	Nstep	Qsn	Qsk	Qky	Um	TP-TOP	KTopt	Notv
1	7(2)	0%	0.500	-2.772	-3.272	0.42	5- 7	26.250 (5.00)	
2	8(0)	0%	1.500	0.597	-0.903	0.42	6- 8	87.500	
3	26(3)	0%	0.700	-0.995	-1.695	0.42	25- 26	25.625 (4.00)	
4	32(4)	0%	1.800	-1.768	-3.568	10.99	31- 32	3.468 (13.00)	
5	37(1)	0%	1.500	-4.136	-5.636	10.99	36- 37	3.468 (13.00)	
<hr/>									
1			W(37)	38.42		+	1- 101	0.964 (8.00)	
2			W(37)	38.42		+	1- 102	0.982 (9.00)	
3	Трансф.		W(7)	10.91		+	3- 4	3.409 (8.00)	
4	V, W		W(7)	10.91		+	3-99999	3.409 (8.00)	
5			=(7)	0.42		+	5- 7	26.250 (5.00)	
6			=(7)	0.42		+	5- 7	26.250 (5.00)	
7			V(32)	38.26		+	10- 103	0.964 (8.00)	
8			V(26)	10.91		+	23- 24	10.455 (9.00)	

SUMMA Qgen= -15.074 MВАp (-0.903)

E	Y	Aa	Ae	Sky	DPky	Tarif	LIMokp	Tay
-	-	-	-	[gpn]	[kvt/kvap]	[gpn/kvt*god]	[mec]	[god]
0.078	0.010	0.080	0.020	600.000	0.002	1.700	24.000	5000

KAP [t.gpn] = 9135 PL_minus [t.gpn] = 6286
 PL_plus [t.gpn] = 449 B [t.gpn] = 913
 !!!!!!!!! TIME_okup =26.20 [mec]
 NOT LIMIT UUU NOT LIMIT TTT



Рисунок 3 – Числові результати оптимізації контрольної схеми. Графік зміни ЕЕРП

Висновки. У ході роботи були сформовані напрямки модернізації промислового комплексу комплексної оптимізації розподілу реактивних потужностей та коефіцієнтів трансформації. Приведені методичні рішення динамічного перетворення матриці Гесе у формат слабозаповненої. Наведені результати оптимізації контрольного прикладу з повним набором технологічних і режимних обмежень.

Перелік посилань

1. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах. - М.: Энергоатомиздат, 1981. – 200с.
2. Гилл Ф. Практическая оптимизация / Гилл Ф., Мюррей У., Райт М.. ; пер. с англ. Лебедев В.Ю. – М.: Мир, 1985. – 509 с.
3. Системные основы методики расчетов платы за перетоки реактивной электроэнергии. Направления развития методической базы. / [Банін Д. Б., Голота А.Д., Сулейманов В.М., Яндутьський О.С.]. – Промелектро. – 2004. - №4. – с. 11-19.
4. Банін Д. Б. Економічні еквіваленти реактивної потужності. Математичний та чисельний аналіз. / Банін Д. Б., Яндутьський О.С., Банін М.Д. – Промелектро. – 2004. -№1. – с. 22-23.
5. Банін Д. Б. Розрахунок та пофідерний аналіз складових технологічних витрат електроенергії в мережах 10(6)/0.4 кВ ВАТ ЕК «Хмельницькобленерго» за допомогою програмного комплексу РАОТВ. / Банін Д. Б., Банін М.Д., Луців П.Д. – Электрические сети и системы. – 2010. – с. 46-67.
6. Банін Д.Б. Практичні питання комплексної системної компенсації реактивної потужності в мережах 110/35/10 кВ електропередавальних організацій. / Банін Д.Б., Банін М.Д., Яндутьський О.С. – Энергетика та електрифікація. – 2013. – №8. – с. 2-13.