

Ю.Н. ВЕПРИК, д-р. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ МЕСТ УСТАНОВКИ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

У роботі представлений алгоритм вибору оптимальних місць установки додаткових компенсуючих пристроїв з метою зниження втрат потужності в електричних мережах, який базується на урахуванні ступеня завантаження елементів мережі і часткових похідних від втрат по реактивних потужностях компенсуючих пристроїв, що встановлені.

В работе представлен алгоритм выбора оптимальных мест установки дополнительных компенсирующих устройств с целью снижения потерь мощности в электрических сетях, основанный на учете степени загрузки элементов сети и частных производных от потерь по реактивным мощностям устанавливаемых компенсирующих устройств.

The algorithm of choice of optimum places of setting of additional compensating devices is in-process presented with the purpose of decline of losses of power electric networks, based on the account of load of network elements and partials from losses on the reactive-powers of the set compensating devices.

Постановка проблемы. Развитие электрических сетей сопровождается увеличением потерь электрической энергии, отпускаемой в сеть. Это обусловлено увеличением средних расстояний между источниками и потребителями электроэнергии, отставанием сетевого строительства и недостатком в установке средств компенсации реактивной мощности. Поэтому задача снижения потерь мощности и энергии в электрических сетях с развитием энергосистем сохраняет свою актуальность.

Анализ последних исследований и публикаций. Снижение потерь мощности и энергии в электрических сетях является важной составляющей общего комплекса энергосберегающих мероприятий. Одним из средств решения этой задачи является оптимизация параметров режима электрической сети – управление потоками мощности, регулирование напряжений в сети, установка и регулирование устройств компенсации реактивной мощности и др. [1,2].

Цель, задачи исследования. Компенсация реактивной мощности в сетях – одно из возможных и эффективных мероприятий, обеспечивающих снижение потерь в электрических сетях, однако эффективность этого мероприятия в значительной степени зависит от того, насколько удачно выбраны места установки дополнительных компенсирующих устройств (КУ) в электрической сети. В то же время алгоритмы поиска наиболее эффективных мест установки

дополнительных компенсирующих устройств еще требуют разработки и совершенствования, так как при неправильном выборе мест установки снижается их эффективность, что ведет к увеличению затрат без получения заметного положительного эффекта.

Основной материал исследований. Если электрическую сеть представить узловыми уравнениями в форме баланса мощностей:

$$P_i = g_{ii}U_i^2 - \sum_{j=1}^{N_i} U_i U_j (b_{ij} \sin \delta_{ij} - g_{ij} \cos \delta_{ij}) = P_i(\delta_i, \delta_j, U_i, U_j), \quad (1)$$

$$Q_i = g_{ii}U_i^2 - \sum_{j=1}^{N_i} U_i U_j (b_{ij} \cos \delta_{ij} - g_{ij} \sin \delta_{ij}) = Q_i(\delta_i, \delta_j, U_i, U_j),$$

где P, Q, U, δ – мощности (активные и реактивные) и напряжения (модули и углы), то потери активной мощности Π при передаче электрической энергии по сети можно определить как алгебраическую сумму активных мощностей, генерируемых и потребляемых во всех N узлах сети:

$$\Pi = \sum_{j=1}^{N_i} P_i(\delta_i, \delta_j, U_i, U_j). \quad (2)$$

Потери мощности ΔP_{ij} в каждой ветви ij и в целом по сети (2) являются явными функциями узловых напряжений U_i, U_j и одновременно неявными функциями мощностей S_i в узлах сети, так как последние через уравнения баланса мощностей (1) определяют U_i, U_j .

Изменения реактивных мощностей в узлах Q_i приводят к изменениям узловых напряжений сети в соответствии с (1). Следствием этого, в свою очередь, является изменение потерь мощности в сети, как это видно из (2). При этом изменения реактивных мощностей должны соответствовать располагаемому диапазону регулирования источников и не вызывать недопустимых отклонений напряжения в узлах сети:

$$Q_{\min} \leq Q_i \leq Q_{\max}; U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max}. \quad (3)$$

Выражения (1) – (3) составляют математическую формулировку оптимизационной задачи, которая состоит в том, чтобы определить места установки и мощность дополнительных КУ, при которых обеспечивается минимум целевой функции (2) и соблюдаются ограничения в форме равенств (1) и неравенств (3). В решении этой общей задачи целесообразно выделить две более узких: 1) выбор места установки дополнительных КУ в сети; 2) определение оптимальных мощностей КУ

в выбранных узлах. В данной статье речь идет о решении первой из этих двух задач.

Целевая функция (2) и уравнение (1) выражаются непрерывными дифференцируемыми функциями, поэтому решение задачи возможно на основе применения градиентных методов. Производные от потерь мощности Π по параметрам режима U_i, δ_i можно получить дифференцированием функции (2):

$$\frac{\partial \Pi}{\partial U_i} = \frac{\partial P_i}{\partial U_i} + \sum_{j=1}^N \frac{\partial P_j}{\partial U_i}; \quad \frac{\partial \Pi}{\partial \delta_i} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} + \sum_{j=1}^N \frac{\partial P_j}{\partial \delta_i}. \quad (4)$$

Слагаемые $\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i}, \frac{\partial P_j}{\partial \delta_i}, \frac{\partial P_i}{\partial U_i}, \frac{\partial P_j}{\partial U_i}$ в (4) являются элементами матрицы

Якоби, используемой в расчете нормального режима сети. Приращение мощностей $\Delta P_i, \Delta Q_i$ и параметров режима $\Delta U_j, \Delta \delta_j$ связаны между собой соотношениями:

$$\sum_{j=1}^N \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \delta_j} \Delta \delta_j + \sum_{j=1}^N \frac{\partial \Delta P_i}{\partial U_j} \Delta U_j = \Delta P_i; \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^N \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \delta_j} \Delta \delta_j + \sum_{j=1}^N \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial U_j} \Delta U_j = \Delta Q_i$$

получаемыми из (1). Поэтому приращения $\Delta U_j, \Delta \delta_j$ модулей и углов векторов узловых напряжений, вызванные включением дополнительной реактивной мощности в одном из узлов сети можно определить, решив линеаризованную систему уравнений (5), в которой вектор-столбец заданных величин в правой части содержит лишь один ненулевой элемент – приращение реактивной мощности ΔQ_i в узле i .

Зная производные (4) и вычислив приращение модулей и углов узловых напряжений при включении дополнительной мощности ΔQ_i в узле i , в соответствии с теорией неявных функций [3] можно определить приращение потерь $\Delta \Pi$, вызванное включением ΔQ_i :

$$\Delta \Pi_i = \sum_{j=1}^N \frac{\partial \Pi}{\partial U_j} \Delta U_j + \sum_{j=1}^N \frac{\partial \Pi}{\partial \delta_j} \Delta \delta_j. \quad (6)$$

Тогда отношение приращения потерь $\Delta \Pi$ к приращению реактивной мощности ΔQ_i в узле i при малых ΔQ_i можно принять равным соответствующей производной:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial Q_i} \cong \frac{\Delta \Pi}{\Delta Q_i}. \quad (7)$$

Чтобы определить производные от потерь при изменении реактивной мощности в каждом из N узлов сети, нужно один раз получить матрицу Якоби, выполнить ее обращение и, задавая в правой части уравнений (5) приращение поочередно в каждом из N узлов, вычислить соответствующие им векторы приращения $\Delta \delta_i, \Delta U_i$, а затем – приращение потерь по выражению (6).

Расчеты производных от потерь Π по реактивным мощностям, выполненные для реальных электрических сетей 110-330 кВ, показывают, что численные значения этих производных изменяются в очень широких пределах – от $1 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-1}$. Для иллюстрации в Табл. 1 приведены результаты таких расчетов для фрагмента электрической сети 330-110 кВ Северной энергосистемы.

Таблица 1 – Влияние дополнительных КУ на потери мощности в сети

Номер узла компенсации	Потери активной мощности $P_{КОМ}$, МВт	Снижение потерь $(\Delta \Pi_{НОРМ})/\Delta Q_i$, МВт/МВАр	Номера узлов в порядке приоритетности
10	3,5924	0,0094	6
11	3,5931	0,0087	9
17	3,5928	0,0090	8
18	3,5919	0,0099	1
20	3,5923	0,0095	5
21	3,5921	0,0097	3
22	3,5920	0,0098	2
24	3,5933	0,0085	10
25	3,5926	0,0092	7
26	3,5923	0,0095	4

Потери активной мощности в исходном нормальном режиме составляют $\Pi_{НОРМ} = 3,6018$ МВт. В Таблице приведены потери после установки дополнительных компенсирующих устройств для ряда узлов сети, удельное (на 1 МВАр) снижение потерь, номера узлов в порядке приоритетности (первые 10 узлов).

Величину производной $\frac{\partial \Pi}{\partial Q_i}$ можно считать показателем эффективности установки дополнительных КУ в узле i , так как она характеризует снижение потерь мощности в соответствующем узле на 1 МВАр установленной дополнительной реактивной мощности. Следовательно, при выборе места установки дополнительных КУ с целью снижения потерь мощности в электрической сети предпочтение нужно отдавать узлам с наибольшим значением $\frac{\partial \Pi}{\partial Q_i}$ и по мере исчерпания возможностей регулирования в таких узлах переходить (если это экономически оправдано) к узлам с меньшими $\frac{\partial \Pi}{\partial Q_i}$.

Расчеты по компенсации с реактивной мощности в электрических сетях показывают также, что если судить только по величине частных производных $\frac{\partial \Pi}{\partial Q_i}$, то среди узлов, которые следовало бы выбрать в качестве мест установки дополнительных КУ, могут оказаться узлы, расположенные как в сильно-, так и в слабо загруженной части сети. Показателем, характеризующим степень загруженности линии можно считать отношение мощности P_{ij} , передаваемой по ВЛ, к её натуральной мощности $P_{\text{нат}}$ (коэффициент загрузки ВЛ):

$$k_z = \frac{P_{ij}}{P_{\text{нат}}} \quad (8)$$

на том основании, что при передаче по ВЛ мощностей, больше натуральной ($k_z > 1$) потребление реактивной мощности превышает её генерацию линией, что приводит к увеличению потерь активной мощности. Поэтому при выборе места установки дополнительных КУ необходимо учитывать также загрузку сети и из узлов с одинаковыми или близкими $\frac{\partial \Pi}{\partial Q_i}$ предпочтение отдавать узлам, к которым примыкают линии с коэффициентом загрузки $k_z > 1$.

В соответствии с изложенным для выбора оптимальных мест установки дополнительных КУ при решении оптимизационной задачи (1) – (3) представляется целесообразным использовать следующий алгоритм:

1. Выполнить расчет исходного режима и выделить загруженную часть сети;
2. Сформировать матрицу Якоби, соответствующую линеаризованным узловым уравнениям баланса мощностей по

напряжению исходного установившегося режима, и получить обратную матрицу Якоби;

3. Выполнить расчет частных производных от потерь мощности в электрической сети по модулям и углам узловых напряжений по формулам (4);

4. Выполнить расчет приращений модулей и углов ΔU_i , $\Delta \delta_i$ узловых напряжений, соответствующих дополнительной реактивной мощности ΔQ_i в каждом из узлов сети по уравнению (5);

5. Выполнить расчет приростов потерь $\Delta \Pi_i$ в загруженной части сети, вызванных дополнительными КУ и производных от потерь по мощности дополнительных КУ по формулам (6) – (7);

6. Выбрать места установки дополнительных КУ с учетом частных производных $\frac{\partial \Pi}{\partial Q_i}$ и загрузки сети.

Выводы.

Наиболее трудоемкие вычислительные операции (п.1–3), необходимые для реализации алгоритма, являются составной частью расчетов нормальных режимов электрической сети, и для решения задачи нужно лишь дополнить их расчетом производных от потерь по мощности дополнительных КУ.

Предлагаемый алгоритм выбора мест установки дополнительных КУ эффективен в сочетании с программой расчета установившегося режима методом Ньютона, при решении линеаризованных уравнений на шаге расчета блочным методом двойной факторизации [4], что подтверждается расчетами по выбору средств компенсации реактивной мощности в электрических сетях.

Список литературы: 1. Потребич А.А. Эффективность выбора мероприятий по снижению потерь энергии в электрических сетях энергосистем / А.А. Потребич // Электрические станции. – 2001. – № 5. – С. 34. 2. Железко Ю.С. Расчет, анализ и нормирование потерь электрической энергии в электрических сетях / Ю.С. Железко, А.Р. Артемьев, О.В. Савченко. – Москва, Изд. НЦ ЭНАС. – 2002. 3. Самарский А.А. Численные методы / А.А. Самарский, А.В. Гулин. – М.: Наука, 1989. – 432 с. 4. Веприк Ю.Н. Задача математического моделирования стационарных режимов электрических систем в обобщенной постановке / Ю. Н. Веприк // Электротехника и электромеханика. — 2010. — № 3. — С. 59-61.

Поступила в редколлегию 05.10.2011