

характеризоваться неполной селективностью, которая исправляется в результате работы АПВ. Исследование и анализ поведения таких защит в переходных и установившихся режимах работы распределительных сетей целесообразно выполнять на базе комплексных математических моделей методом вычислительного эксперимента.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ш а б а д, М. А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей / М. А. Шабад. – Л., 1985.
2. Ш а б а д, М. А. Выбор характеристик и уставок цифровых токовых защит серии SPACOM и RE – 500 / М. А. Шабад. – СПб., 2000.
3. Ч е р н о б р о в о в, Н. В. Релейная защита / Н. В. Чернобровов. – М.: Энергия, 1974.
4. А н д р е е в, В. А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения / В. А. Андреев. – М.: Высш. шк., 1991.

Представлена кафедрой  
электрических станций

Поступила 07.07.2008

УДК 621.315

### **ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ОТ ПЕРЕТОКОВ РЕАКТИВНЫХ МОЩНОСТЕЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ И ПУТИ ИХ ОГРАНИЧЕНИЯ**

**Инж. ПОСПЕЛОВ Е. Г.,  
засл. деят. науки и техн. РБ, докт. техн. наук, проф. ПОСПЕЛОВ Г. Е.**

*Белорусский национальный технический университет*

Потери электроэнергии в электрических сетях СНГ возрастают. В электрических сетях РАО «ЕЭС России» за последние 10 лет увеличились потери от 8 до 13,1 % [1]. Потери в электрических сетях ГПО «Белэнерго» за 2006 г. составили 11,25 % [2], в то время как в промышленно развитых странах потери в сети составляют 4–6 % и постоянно снижаются. Основной причиной больших потерь в сетях СНГ являются перетоки реактивной мощности, включающие зарядные мощности линий. В частности, максимальная реактивная мощность в сетях РАО «ЕЭС России» составляет 165 Гвар; нагрузка в режиме минимума потребляет 60 Гвар, а оставшаяся реактивная мощность растекается по сети, увеличивая потери и создавая повышенные уровни напряжения [1].

Потери энергии на нагрев проводов наиболее точно могут быть подсчитаны, если известны графики работы линии и распределение проходящего тока вдоль линии. Тогда за время  $t$  потери на нагревание проводов можно определить по формуле

$$\Delta \mathcal{E}_h = 3 \int_0^L \int_0^L I^2 r_0 dl dt, \quad (1)$$

где  $I$  – ток, текущий в какой-либо точке, расположенной на расстоянии  $l$  от конца линии;  $r_0$  – активное сопротивление на 1 км линии;  $L$  – длина линии (рис. 1).

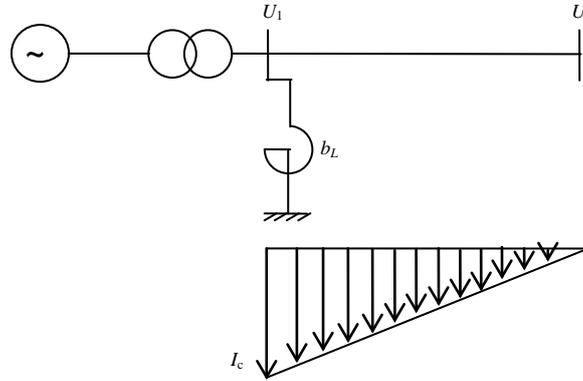


Рис. 1. Распределение емкостных токов вдоль линии  $U_1 = U_2 = U$

Большие значения емкостных токов вызывают существенные изменения тока вдоль линий, что делает практически затруднительным и нецелесообразным использование (1). В связи с отмеченными трудностями воспользуемся понятием времени потерь для емкостного тока  $\tau_c$  [3] и методикой определения потерь энергии в киловатт-часах по формуле [3]

$$\Delta \mathcal{E}_h = \frac{3I_M^2 \rho L \cdot 10^{-3}}{F} \tau + \frac{I_c^2 \rho L \pm 3I_p I_c \rho L}{F} \tau_c \cdot 10^{-3}, \quad (2)$$

где  $I_M$  – максимальное значение рабочего тока линии;  $\rho$  – удельное сопротивление провода;  $F$  – сечение провода;  $\tau$  – время потерь, ч;  $\tau_c$  – время потерь для емкостного тока  $I_c$ , учитывающее возможности компенсации емкостного тока линии в режимах холостого хода и малых нагрузок, ч;  $I_p$  – реактивная составляющая рабочего тока линии берется со знаком «+» при емкостном характере и с «-» – при индуктивном.

Величина  $\tau_c$  может быть определена по графикам [4–6], на которых построены зависимости  $\tau_c$  от числа часов использования наибольшего перетока по линии  $T_M$  величины расчетной максимальной нагрузки линии и среднего перепада напряжения, с которым работает линия в течение года.

Потери мощности от прохождения рабочего тока и емкостного тока линии могут быть представлены следующим образом:

$$\Delta P = 3I_a^2 R + 3 \int_0^L \left( \frac{I_c}{L} l + I_p \right)^2 r_0 dl, \quad (3)$$

где  $I_a$  и  $I_p$  – активная и реактивная составляющие рабочего тока линии;  $I_p$  берется со знаком «+» при емкостном характере и с «-» – при индуктивном;  $I_c$  – емкостный ток, который рассматривается как равномерно распре-

деленный вдоль линии;  $\frac{I_c l}{L}$  – емкостный ток в точке, находящейся на расстоянии  $l$  от конца линии.

После интегрирования и преобразований получим

$$\Delta P = 3 \left( I^2 \pm I_p I_c + \frac{I_c^2}{3} \right) r_0 L. \quad (4)$$

Откуда следует, что за счет емкостной составляющей тока  $I_p$  потери мощности и энергии в проводах могут быть уменьшены.

Величина потерь активной мощности от емкостного тока линии  $\Delta P_{ac}$  может быть получена из выражения (4), записанного для режима холостого хода ( $I = I_p = 0$ ) в следующем виде:

$$\Delta P_{Qc} = I_c^2 r_0 L, \quad (5)$$

или можно представить через зарядную мощность линии  $Q_3$

$$\Delta P_{Qc} = \frac{Q_3^2}{3U_c^2} R, \quad (6)$$

где  $U_c$  – среднее значение напряжения линии по ее протяженности.

В данном случае ток на приемном конце линии равен нулю и весь емкостный ток линии стекает к передающей подстанции.

Рассмотрим симметричный режим линии при отсутствии активной нагрузки, при равенстве напряжений по концам линии ( $U_1 = U_2 = U$ ) и соответственно одинаковых по абсолютной величине реактивных мощностях в начале и конце линии ( $q_1 = -q_2$ ). Тогда для каждой половины линии можно применить формулу (6) и для потерь активной мощности от потоков реактивной мощности во всей линии в целом записать:

$$\Delta P_Q = \frac{\left( \frac{Q_3}{2} \right)^2}{3U^2} \frac{R}{2}$$

или

$$\Delta P_Q = \frac{Q_3^2}{12U^2} R. \quad (7)$$

В этом случае половина зарядной мощности стекает в приемную систему, а половина – к передающей электростанции. Перейдем к общему случаю. По линии передается активная мощность, напряжения и потоки реактивной мощности неодинаковы. Здесь, как и в случае симметричного режима, для определения потерь активной мощности от потоков реактивной мощности может быть использована формула (6). При этом линия электропередачи может рассматриваться как два участка, каждый из которых имеет односторонний сток реактивной мощности, и потери активной мощности от потоков реактивной мощности для всей линии определились по формуле [6]

$$\Delta P_Q = \frac{Q_1^2}{6U_1^2} R(1 - K_n) + \frac{Q_2^2}{U_2^2} R(1 + K_n), \quad (8)$$

где для первого участка линии вместо напряжения  $U_{cp}$  взято  $U_1$ , а для второго  $U_2$ ;  $Q_1$  и  $Q_2$  – потоки реактивной мощности в начале и конце линий;  $K_n$  – коэффициент несимметрии режима линии,

$$K_n = \frac{Q_1 + Q_2}{b_c(U_1^2 + U_2^2)(1 + p^2)}, \quad (9)$$

где  $b_c$  – емкостная проводимость в П-образной схеме замещения линии;  $p$  – передаваемая активная мощность в долях от натуральной мощности линии.

При симметричном режиме линии:  $U_1 = U_2$ ;  $Q_1 = -Q_2$ ;  $K_n = 0$ , и из общей формулы (8) получим (7) для частного случая.

Потери электроэнергии от протекания потоков реактивной мощности могут быть рассчитаны по (9) и (8) по следующему алгоритму [6]:

1) для начального момента времени  $t = 0$  и максимальной удельной передаваемой активной мощности подсчитываются удельные реактивные мощности  $Q_1$  и  $Q_2$ ;

2) по (9) находится коэффициент несимметрии режима линии;

3) по (8) определяются потери активной мощности от перетоков реактивной мощности, соответствующих рассматриваемой нагрузке, для установления  $\tau_0$ ;

4) найденное значение  $\Delta P_a$  откладывается на графике потерь реактивной мощности.

Далее по всем пунктам расчеты повторяются аналогично для других значений активной мощности. В результате получится график потерь активной мощности от перетоков реактивной мощности. Тогда  $\tau_0$  определится как частное от деления этой площади на значение потерь активной мощности от емкостных токов линии при холостом ходе. Расчеты [7] показали, что наименьшие потери получаются при передаче натуральной мощности. Чем меньше удельная передаваемая мощность  $p$ , тем больше время потерь  $\tau_c$  и больше потери энергии на нагревание проводов от протекания реактивных мощностей, в том числе и от емкостных токов линии.

Распределение емкостных токов линии при постоянстве напряжения вдоль линий показано на рис. 1, картина распределения емкостных токов линии при включении в промежуточных пунктах линии управляемых шунтирующих реакторов – на рис. 2. Выделив на расстоянии  $l$  от конца бесконечно малый участок  $dl$  (рис. 2), составим выражение потерь активной мощности участка, затем, интегрируя от конца к началу линии, получим потери активной мощности в линии:

$$\begin{aligned} \Delta P_n = & \int_0^{l_{1п}} [I_{2a}^2 + (i_{0c}l - I_{2p})^2] r_0 dl + l \int_{l_{1п}}^{l_{2п}} [I_{2a}^2 + (i_{0c}l - I_{2p} - I_{p1})^2] r_0 dl + \\ & + \int_{l_{2п}}^{l_{3п}} [I_{2a}^2 + (i_{0c}l - I_{2p} - I_{p1} - I_{p2})^2] r_0 dl + \dots + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \int_{l_{\text{нп}}}^{l_{\text{н+п}}} [I_{2a}^2 + (i_{0c}l - I_{2p} - I_{p1} - I_{p2} - \dots - I_{pn})^2] r_0 dl + \dots + \\
& + \int_{l_{\text{кп}}}^L [I_{2a}^2 + (i_{0c}l - I_{2p} - I_{p1} - I_{p3} - \dots - I_{pK})^2] r_0 dl,
\end{aligned} \tag{10}$$

или

$$\begin{aligned}
\Delta P_{\text{л}} = & I_{2a}^2 R + \int_0^L [(i_{0c}l - I_{2p})^2] r_0 dl + \int_{l_{\text{нп}}}^L [I_{2a}^2 - 2(i_{0c}l - I_{2p})I_{p1}] r_0 dl + \\
& + \int_{l_{2\text{п}}}^L [I_{2p}^2 - 2(i_{0c}l - I_{2p})I_{p2} + 2I_{p1}I_{p2}] r_0 dl + \\
& + \int_{3\text{п}}^L [I_{p3}^2 - 2(i_{0c}l - I_{2p})I_{p3} + 2I_{p1}I_{p3} + I_{p2}I_{p3}] r_0 dl + \\
& + \int_{\text{нп}}^L [I_{pn}^2 - 2(i_{0c}l - I_{2p})I_{pn} + 2I_{p1}I_{pn} + 2I_{p2}I_{pn} + \dots + 2I_{pn-1}I_{pn}] r_0 dl + \dots + \\
& + \int_{\text{кп}}^L [I_{pK}^2 - 2(i_{0c}l - I_{2p})I_{pK} + 2I_{p1}I_{pK} + 2I_{p2}I_{pK} + \dots + 2I_{pK-1}I_{pK}] r_0 dl,
\end{aligned} \tag{11}$$

где  $I_{2a}$ ,  $I_{2p}$  – активный и реактивный токи в конце линии;  $I_{2p}$  подставляется со знаком «+» при индуктивном характере и «-» – при емкостном характере;  $i_{0c} = \frac{I_c}{L}$  – емкостный ток на единицу длины линии;  $I_c$  – емкостный ток линии;  $r_0$  – активное сопротивление 1 км линии;  $I_p$ ,  $I_{p2}$ , ...,  $I_{pK}$  – токи шунтирующих реакторов.

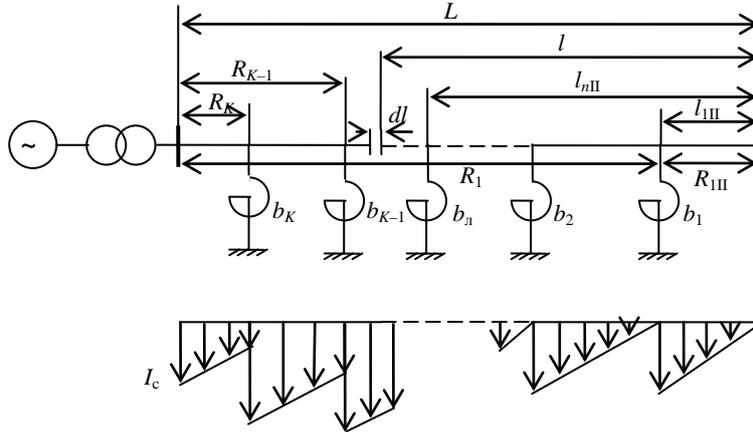


Рис. 2. Распределение емкостных токов вдоль линии с шунтирующими реакторами  $U_1 = \dots U_K \dots = U_2 = U$

Выполняя интегрирование, получим

$$\Delta P_{\text{л}} = I^2 R + \frac{1}{3} I_c^2 R - I_c I_{p2} R_{\text{нп}} - I_c I_{p1} R + I_{c\text{нп}} I_{p1} R_{\text{нп}} + 2I_{p2} I_{p1} R_1 + I_{p2} R_2 -$$

$$\begin{aligned}
& -I_c I_{p2} R + I_{c2\Pi} I_{p2} R_{2\Pi} + 2I_{p1} I_p R_2 + 2I_{p1} I_{p2} R_2 + I_{2p}^2 R_3 - I_c I_{p3} R + I_{c3\Pi\Pi} I_{p3} R_{3\Pi} + \\
& + 2I_{2p} I_{p3} R_3 + 2I_{p1} I_{p2} R_3 + 2I_{2p} I_{p3} R_3 + \dots + I_{pK}^2 R_K - I_c I_{pK} R + I_{cK\Pi} R_{K\Pi} + \\
& + 2I_{2p} I_{pK} + 2I_{p1} I_{pK} R_K + 2I_{2p} I_{pK} R_K + \dots + 2I_{pK-1} I_{pK} R_K,
\end{aligned} \quad (12)$$

или сокращенно

$$\begin{aligned}
\Delta P_{л} = & I_2^2 R + \frac{1}{3} I_c^2 R - I_c I_{2p} R - I_c R \sum_1^K I_{pK} + \sum_1^K I_{c\Pi\Pi} I_{pn} R_{\Pi\Pi} + \\
& + 2I_{2p} \sum_1^n I_{pn} R_n + 2 \sum_2^n I_{pn-1} I_{pn} R_n + \sum_1^K I_{2n}^2 R_n,
\end{aligned} \quad (13)$$

где  $R$  – активное сопротивление линии;  $I_{c\Pi\Pi}$  – емкостный ток участка линии от места включения  $n$ -го реактора до конца линии;  $R_{\Pi\Pi}$  – активное сопротивление от точки включения  $n$ -го реактора до конца линии.

В относительных единицах на базе натуральной мощности потери в линии запишутся в виде

$$\begin{aligned}
\Delta P_{л} = & s_2^2 r + \frac{1}{3} b_c r - b_c q_2 r \sum_1^K b_{pn} + \sum_1^K b_{c\Pi\Pi} b_{pn} r_{\Pi\Pi} + \\
& + 2q_2 \sum_1^K b_{pn} r_n + 2 \sum_2^K I_{pK-1} r_n + \sum_1^K b_{pn}^2 r_n,
\end{aligned} \quad (14)$$

где  $s_2$  – полная мощность в относительных единицах на базе натуральной мощности в конце линии;  $q_2$  – реактивная мощность в относительных единицах в конце линии;  $r$ ,  $b$  – активное сопротивление и емкостная проводимость линии;  $r_{\Pi\Pi}$ ,  $b_{c\Pi\Pi}$  – то же участков от точек включения реакторов до конца линии.

Для линии передачи без реакторов или с реакторами в начале и конце линии:

$$\Delta P_{л} = I^2 R + \frac{1}{3} I_c^2 R - I_c I_{2p} R, \quad (15)$$

или в относительных единицах

$$\Delta P_{л} = S_2^2 r + \frac{1}{3} b_c r - i_c q_2 r. \quad (16)$$

Аналогично для линии с одним реактором в промежуточной точке:

$$\Delta P_{л} = I^2 R + \frac{1}{3} I_c^2 R - I_c I_{2p} R + I_{c\Pi} R_{\Pi} + 2I_{2p} I_p R_1 + I_p^2 R_1 \quad (17)$$

и

$$\Delta P_{л} = S_2^2 r + \frac{1}{3} b_c^2 r - b_c b_p r + b_{0\Pi} b_p r_{\Pi} + 2q_2 b_p r_1 + b_p^2 r_1 - b_0 q_2 r. \quad (18)$$

Полученные соотношения позволяют дать оценку потерям мощности линии с промежуточными шунтирующими реакторами. На основе этих соотношений можно проследить влияние емкостных токов и потоков реактивной мощности на потери активной мощности в линии.

Из (15) и (16) следует, что наименьшие потери мощности будут при передаче мощности, менее натуральной, когда  $I_{2p} > 0$  и  $q_2 > 0$ .

Наличие шунтирующего реактора, как видно из (17) и (18), может изменить характер влияния тока  $I_{2p}$  (или реактивной мощности  $q_2$ ) на потери активной мощности. Это влияние становится меньше, чем при отсутствии реактора. За счет шунтирующего реактора потери активной мощности линии могут оказаться меньше при емкостном токе  $I_{2p}$ , чем индуктивном.

Шунтирующий реактор согласно (17) может уменьшить потери активной мощности в линии при условии

$$-I_c I_{2p} R - I_c I_c R + I_{cII} R_{II} + 2I_{2p} I_p R_1 + I_p^2 R_1 < 0.$$

Кроме того, потери уменьшаются за счет выравнивания напряжения линии при включении шунтирующего реактора.

Для обеспечения экономичности передачи необходимо применение управляемых шунтирующих реакторов (трансформаторного типа или с подмагничиванием).

Управляемые шунтирующие реакторы дают возможность также использовать технологию электропередач, настроенных на передаваемую мощность [8]. По этой технологии натуральная мощность линии передачи равна расчетной передаваемой мощности проектируемой линии, что достигается за счет расщепления проводов и компактизации линии. Для обеспечения экономичности передачи мощности, менее натуральной, в соответствии с графиком нагрузки предлагается [8] использовать управляемые шунтирующие реакторы (УШРТ). Применение УШРТ при изменении режима работы электропередачи от нуля при передаче натуральной мощности до номинальной мощности в режиме холостого хода линии исключает необходимость применения источников реактивной мощности (ИРМ). 100%-я компенсация емкостной проводимости линий исключает повышение напряжений на них сверх наибольшего рабочего напряжения в режимах малых нагрузок и в режиме холостого хода. При изменении передаваемой мощности ток через УШРТ автоматически изменяется так, что для любой нагрузки УШРТ автоматически настраивает линию на квазинатуральный режим вплоть до ее натуральной мощности.

Размещение УШРТ вдоль линии осуществляется из условия допустимости повышений напряжений не более наибольшего рабочего напряжения линий при равенстве напряжений по концам участков между двумя соседними подстанциями УШРТ номинальному напряжению линии (рис. 3). На рис. 3 показано распределение емкостных токов между подстанциями УШРТ.

Влияние размещения шунтирующих реакторов на потери мощности и КПД линий подробно рассмотрены [3]. Наиболее вероятными местами включения реактора, для которых получается наибольший КПД, следует считать начало и середину линии. Для электропередач, настраиваемых на передаваемую мощность, рекомендуется [8] установка управляемых шунтирующих реакторов через каждые 500–600 км.

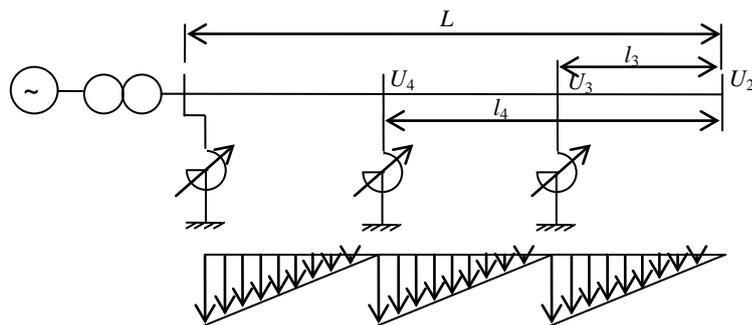


Рис. 3. Распределение емкостных токов вдоль линии с управляющими шунтирующими реакторами  $U_1 = U_4 = U_3 = U_1$

### ВЫВОДЫ

1. Перетоки реактивной мощности в электрических сетях энергосистем могут существенно увеличивать потери активной мощности и энергии.
2. Эффективным средством уменьшения потерь электроэнергии в электрических сетях может быть управляемый шунтирующий реактор, который одновременно повысит пропускную способность и ограничит повышение напряжений ЛЭП.
3. Перетоки реактивной мощности определяются в основном зарядной мощностью линий, короткие линии фактически образуют длинную линию с проблемами компенсации реактивной мощности и регулирования напряжения.
4. Полученные соотношения позволяют определять и минимизировать потери активной мощности и энергии от перетоков реактивной мощности.

### ЛИТЕРАТУРА

1. С о р о к и н, В. М. Управляемая компенсация дальних линий электропередачи / В. М. Сорокин, Л. И. Дорожко // Известия РАН. Энергетика. – 2005. – № 3. – С. 75–83.
2. П р о г р а м м а до 2011 года // Энергия и Менеджмент. – 2007. – № 6. – С. 4–8.
3. П о с п е л о в, Г. Е. Элементы технико-экономических расчетов систем электропередач / Г. Е. Поспелов. – Минск: Вышэйш. шк., 1967. – 311 с.
4. П о д с ч е т потерь энергии от перетоков реактивной мощности в линиях 750 кВ / Г. Е. Поспелов [и др.] // Дальние электропередачи 750 кВ. – М.: Энергия, 1974. – Ч. 1.
5. П о с п е л о в, Г. Е. Передача энергии и электропередачи / Г. Е. Поспелов, В. Т. Федин. – Минск: Адукацыя і выхаванне, 2003. – 443 с.
6. В е н и к о в, В. А. Электрические системы. Режимы работы электрических систем и сетей / В. А. Веников, Л. А. Жуков, Г. Е. Поспелов; под ред. В. А. Веникова. – М.: Высш. шк., 1975. – 344 с.
7. П о с п е л о в, Е. Г. Алгоритм определения потерь мощности и энергии от перетоков реактивной мощности в протяженных линиях электропередачи / Е. Г. Поспелов // Электричество. – 1974. – № 8.
8. А л е к с а н д р о в, Г. Н. Технология гибких линий электропередачи и электропередач, настроенных на передаваемую мощность / Г. Н. Александров // Электричество. – 2006. – № 6. – С. 2–6.

Представлена кафедрой  
электрических систем

Поступила 26.06.2008