

## Лекция № 3

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ СРЕДСТВ КОМПЕНСАЦИИ  
РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Основными источниками реактивной мощности, как известно, являются генераторы электрических станций, линии электропередачи (за счет зарядной мощности) и компенсирующие устройства поперечной, компенсации, подключаемые параллельно нагрузке. Как было отмечено в главе 4, включение в узлы электрической сети компенсирующих устройств приводит к разгрузке элементов сети от реактивной мощности, следствием этого является снижение нагрузочных потерь мощности и электроэнергии. Таким образом, за счет изменения потоков реактивной мощности (управления ими) можно улучшить экономические показатели сети.

Задача оптимизации управления потоками реактивной мощности разделяется на две подзадачи; проектную, связанную с выбором дополнительных компенсирующих устройств, и эксплуатационную, при решении которой требуется выбрать оптимальные режимы работы уже установленных в сети компенсирующих устройств.

При решении проектной задачи необходимо выбрать оптимальные места установки компенсирующих устройств и их оптимальные мощности в каждом из выбранных мест. Поскольку денежные средства, выделяемые на установку компенсирующих устройств, как правило, ограничены, и ввод в работу компенсирующих устройств может производиться поэтапно, то одновременно возникает задача нахождения наиболее рациональной очередности установки компенсирующих устройств в различных местах.

В общем случае установка, дополнительного компенсирующего устройства мощностью  $Q_{ki}$  в  $i$ -м узле сети будет эффективной, если чистый-дисконтированный доход, вычисленный по формуле (12.19), будет положительным:

$$\text{ЧДД}(Q_{ki}) = \sum_{t=1}^T \frac{D_{it} - I_{it} - K_{it}}{(1+E)^t} > 0. \quad (6)$$

Если сравнивать установку компенсирующего устройства одной и той же мощности в различных узлах сети и полагать, что капитальные затраты, при этом одинаковы (это соответствует одинаковому типу компенсирующего устройства) то формула (6) примет вид:

$$\text{ЧДД}(Q_{ki}) = \sum_{t=1}^T \frac{D_{it} - I_{it}}{(1+E)^t} - K_k, \quad (7)$$

где  $K_k$  — капитальные затраты на компенсирующее устройство, осуществляемые в течение одного года.

Установка дополнительного компенсирующего устройства наиболее выгодна в том узле, для которого

$$\text{ЧДД}(Q_{ki}) = \max.$$

В формуле (7) применительно к компенсирующим устройствам ежегодные издержки  $I_{Ti}$  по годам в проектных расчетах можно считать неизменными, т. к. они состоят из отчислений от капитальных затрат и стоимости потерь электроэнергии в компенсирующих устройствах, которые при неизменном их режиме работы можно считать постоянными. Что касается дохода  $D_{Ti}$  от установки компенсирующего устройства, то он по годам остается неизменным только в том случае, если нагрузки сети не изменяются. Такие случаи имеют место, например, при установке компенсирующего устройства в сети промышленного предприятия с конкретным неизменным режимом работы. В общем же случае  $D_{Ti}$  может изменяться по годам вследствие изменения нагрузки сети и соответственно потерь энергии. Однако при перспективном проектировании нагрузку сети на каждый год определить достаточно точно не представляется возможным, имея в виду, что в формулах (6), (7) расчетный период  $T$  принимается значительным, равным сроку службы объекта и даже большим. Если полагать, что  $D_{Ti}$  по годам не изменяется, то от формулы (7) можно перейти к выражению приведенных затрат, на основании которого эффективность установки дополнительного  $i$ -го компенсирующего устройства представить в виде:

$$D(Q_{ki}) - Z_k(Q_{ki}) > 0, \quad (8)$$

где  $D(Q_{ki})$  — доход, получаемый при установке дополнительного компенсирующего устройства мощностью  $Q_{ki}$ ;  $Z_k(Q_{ki})$  — затраты, связанные с установкой дополнительного компенсирующего устройства.

Установка дополнительного компенсирующего устройства окажется наиболее выгодной в том узле сети, для которого экономический эффект

$$D(Q_{ki}) - Z_k(Q_{ki}) = \max. \quad (9)$$

В ряде случаев целесообразные места установки компенсирующих устройств могут быть определены без проведения каких-либо предварительных расчетов. Так, для сети, состоящей из одной линии с одной нагрузкой на конце (рис. 7, а), существует единственное место установки компенсирующего устройства в узле 1. При мощности компенсирующего устройства  $Q_k$  реактивная мощность в линии составит  $Q - Q_k$ , потери мощности будут

$$\Delta P = \frac{P^2 + (Q - Q_k)^2}{U^2} R,$$

а снижение потерь

$$\delta P = \Delta P_0 - \Delta P,$$

где  $\Delta P_0$  — потери мощности без компенсирующего устройства.

Если изменять мощность  $Q_K$  то при неизменных нагрузках  $P_1$  и  $Q_1$  снижение потерь мощности  $\delta P$  будет изменяться так, как показано на рис. 8. Очевидно, что наибольшее снижение потерь будет тогда, когда  $Q_K = Q$ . Если выбрать мощность компенсирующего устройства  $Q_K > Q$ , то реактивная мощность в линии будет направлена не от источника к потребителю, а наоборот от узла 1 к узлу 0. При этом потери мощности по сравнению со случаем, когда  $Q_K = Q$  начнут возрастать, а снижение потерь будет уменьшаться (правая ветвь кривой). При  $Q_K = 2Q$  будем иметь  $\delta P = 0$ , а при  $Q_K > 2Q$  снижение потерь оказывается даже отрицательным, т. е. потери мощности станут больше, чем в исходном режиме без компенсирующего устройства. Очевидно, что мощность компенсирующего устройства должна выбираться в диапазоне от 0 до  $P$ , т. к. при  $Q_K > Q$  эффект от снижения потерь уменьшается, и при этом возрастают капитальные затраты на компенсирующие устройства.

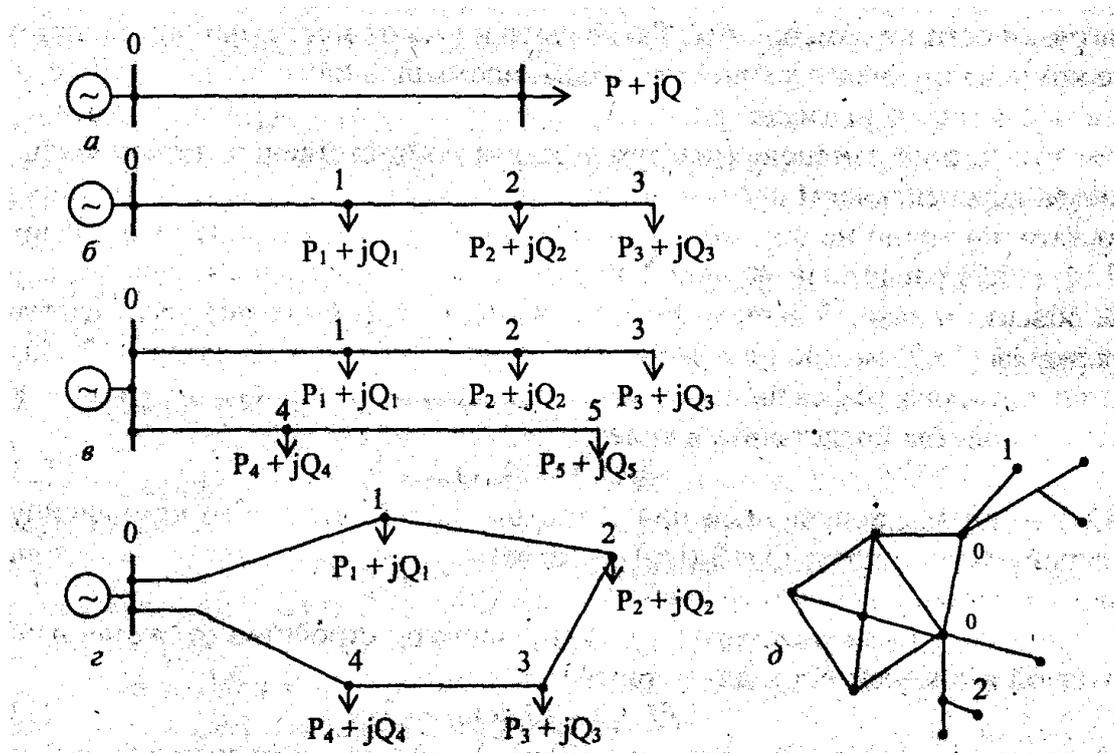


Рис. 7. Схемы сети: *a* — с одной нагрузкой;  
*б* — с несколькими нагрузками; *в* — с несколькими линиями;  
*г* — замкнутая с несколькими нагрузками;  
*д* — питающая (системообразующая) с распределительными сетями

Снижение потерь мощности за счет установки компенсирующего устройства можно представить так:

$$\delta P = \Delta P_0 - \Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R - \frac{P^2 + (Q - Q_K)^2}{U^2} R = \frac{(2Q - Q_K) Q_K}{U^2} R.$$

Тогда удельная экономия на потерях мощности, приходящаяся на единицу мощности компенсирующего устройства,

$$k_3 = \frac{\delta P}{Q_K} = \frac{2Q - Q_K}{U^2} R. \quad (10)$$

Характер зависимости  $k_3 = f(Q_K)$  показан на рис. 8, из которого видно, что при увеличении мощности  $Q_K$  удельный эффект от снижения потерь снижается. При этом удельная экономия становится равной нулю при полной компенсации реактивной мощности ( $Q_K = Q$ ), а при дальнейшем увеличении  $Q_K$  значение  $k_3$  становится отрицательным.

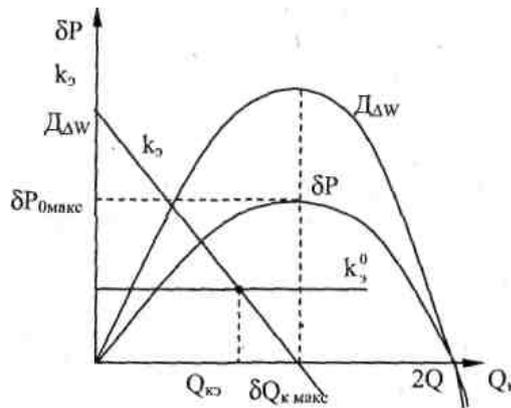


Рис. 8. Зависимости  $\delta P$ ,  $k_3$  и  $D_{\Delta w}$  от мощности компенсирующего устройства

Доход от снижения потерь активной мощности и энергии можно выразить так:

$$D_{\Delta w} = (\Delta P_0 \tau_{0P} - \Delta P \tau_P) \beta = \delta P \tau_P^{cp} \beta, \quad (11)$$

где  $\Delta P_0$ ,  $\Delta P$  — потери активной мощности соответственно до и после установки компенсирующего устройства в режиме наибольших нагрузок;  $\tau_{0P} > \tau_P$  — время наибольших потерь от передачи реактивной мощности соответственно до и после компенсации;  $\tau_P^{cp}$  — среднее значение времени наибольших потерь;  $\beta$  — стоимость 1 кВт-ч потерь энергии.

С учетом формулы (10) можно записать:

$$D_{\Delta w} = Q_K k_3 \tau_P^{cp} \beta. \quad (12)$$

Характер зависимости  $D_{\Delta w} = f(Q_K)$  повторяет кривую  $\delta P = f(Q_K)$  (рис. 8).

Для линии с несколькими нагрузками (7, б) компенсирующие устройства могут быть установлены в узлах 1, 2 и 3. Здесь также без расчетов очевидно, что первоначально самой эффективной точкой является узел 3. Действительно, при размещении компенсирующего устройства в узле 3 произойдет разгрузка от реактивной мощности всех участков сети 23, 12 и 01. Если бы компенсация первоначально была произведена, например, в узле 2, то снижение потерь произошло бы только на участках 01 и 12, а на участке 23 потери мощности не изменились. Однако мощность компенсирующего устройства  $Q_{3K}$  в узле 3 не должна превышать  $Q_3$ , т.к. в противном случае при перекомпенсации реактивная мощность будет направлена от узла 3 к узлу 2, что приведет к

повышению потерь. Если принято решение установить в сети мощность компенсирующего устройства  $Q_k$  большую, чем  $Q_{3k}$ , то следующее устройство целесообразно разместить в узле 2. При этом его мощность должна быть  $Q_2 = Q_k - Q_{3k}$ , но не больше  $Q_2$ . Аналогичным образом рассматривают и другие узлы при движении в сторону источника питания.

При этом для каждого  $i$ -го узла, в котором устанавливается компенсирующее устройство, может быть вычислено удельное снижение потерь мощности по формуле (10):

$$k_{ij} = \frac{\delta P_j}{Q_{ij}}. \quad (13)$$

Для более сложных схем сети (рис. 7, в, з) без расчетов неочевидно, какую необходимо принять очередность установки компенсирующих устройств в различных узлах. При этом следует руководствоваться критерием (13). Для его вычисления поочередно во всех узлах устанавливают компенсирующее устройство некоторой небольшой мощности, выполняют расчеты установившихся режимов и находят для каждого режима удельное снижение потерь мощности  $k_{3j}$ . Наиболее целесообразным узлом к установке компенсирующего устройства будет узел, для которого выполняется условие

$$k_{3i} = \max. \quad (13.14)$$

На основании изложенного подхода может быть выбрана очередность установки компенсирующих устройств в сети любой конфигурации и по формуле (12) вычислен доход от снижения потерь энергии при различной суммарной мощности  $Q_k$ .

Затраты, связанные с установкой компенсирующего устройства (см. формулу (8)), можно определить по выражению

$$Z_k = (E + p)k_{уд}Q_k + \Delta P_{уд}Q_k T_k \beta, \quad (15)$$

где  $E$  — банковский процент на предоставление кредита;  $p$  — отчисления на амортизацию и текущий ремонт компенсирующего устройства;  $k_{уд}$  — удельные капитальные затраты на компенсирующее устройство;  $\Delta P_{уд}$  — удельные потери мощности в компенсирующем устройстве;  $T_k$  — число часов работы компенсирующего устройства в году.

Выражение (15) можно представить в виде

$$Z_k = Q_k T_k \beta_k, \quad (16)$$

если расчетное значение стоимости 1 квар-ч, выдаваемого компенсирующим устройством, определять формулой

$$\beta_k = \Delta P_{уд} \beta + \frac{k_{уд}(E + p)}{T_k}.$$

Приравняем доход по формуле (12) и затраты на компенсирующее устройство по формуле (16):

$$Q_k k_p \tau_p^{\text{сп}} \beta = Q_k T_k \beta_k$$

Отсюда найдем граничное значение удельного снижения потерь мощности ниже которого установка компенсирующего устройства нецелесообразна:

$$k_p^0 = \frac{T_k \beta_k}{\tau_p^{\text{сп}} \beta} \quad (17)$$

Кроме снижения потерь активной мощности и энергии, установка компенсирующих устройств позволяет улучшить режимы напряжений и снизить потери реактивной мощности в сети. Режимы напряжений при решении задачи обычно контролируются вводимыми соответствующими ограничениями. Что касается снижения потерь реактивной мощности, то этот фактор влияет на баланс реактивной мощности в сети и позволяет несколько уменьшить мощность компенсирующих устройств. Доход от уменьшения мощности компенсирующих устройств за счет снижения потерь реактивной мощности, как показывают расчеты, значительно ниже дохода от снижения потерь активной энергии и составляет

$$D_Q < (0,06 \dots 0,1) D_{\Delta w}$$

С учетом этого выражение (17) примет вид

$$k_p^0 = \frac{T_k \beta_k}{(1,0 \dots 1,1) \tau_p^{\text{сп}} \beta} \quad (18)$$

Критерии (17) и (18) позволяют при оптимизации размещения компенсирующих устройств перейти от экономических критериев (6) и (7) к техническим, что существенно облегчает решение задачи.

С учетом этих критериев установка компенсирующего устройства в  $i$ -м узле нагрузки целесообразна в том случае, если фактическое удельное снижение потерь мощности в режиме наибольших нагрузок больше граничного значения (рис. 8):

$$k_{pi} > k_p^0 \quad (19)$$

При этом экономически целесообразная мощность компенсирующего устройства равна  $Q_{кЭ}$ .

Установка компенсирующих устройств в распределительной сети, подключенной к какому-то узлу 0 питающей (системообразующей) сети (рис. 7, д), оказывает влияние на баланс реактивной мощности в этом узле и соответственно на потери мощности в питающей сети. Поэтому эффективность компенсирующих устройств должна оцениваться при совместном рассмотрении питающих и распределительных сетей. Это можно осуществить также с помощью критерия (19) следующим образом.

Для каждого узла распределительной сети  $i$ , например, 1 и 2 (рис. 7, д) находится оптимальное размещение компенсирующих устройств различной суммарной мощности, после чего строятся зависимости дохода от снижения потерь энергии  $D_{\Delta w}^p = f(Q_k)$  и удельного снижения потерь

мощности  $k_{\Sigma}^p = f(Q_K)$  по типу рис. 8. Совместив эти зависимости с линией, соответствующей граничному экономически целесообразному значению  $k_{\Sigma}^0$ , можно сделать вывод о том, что по словию оптимизации режима  $i$ -й распределительной сети экономически целесообразная суммарная мощность компенсирующих устройств равна  $Q_{K\Sigma}$ , при которой  $k_{\Sigma}^p = k_{\Sigma}^0$ . Затем переходят к оптимизации размещения компенсирующих устройств в питающей сети, используя в качестве критерия условие (19), записанное в виде

$$k_{\Sigma i} = k_{\Sigma, n} + k_{\Sigma i}^p, \quad (13.20)$$

где  $k_{\Sigma, n}$  — удельное снижение потерь мощности в питающей сети при установке компенсирующего устройства в  $i$ -м узле.

Таким образом, показатель  $k_{\Sigma i}$  характеризует снижение потерь как в питающей, так и в распределительной сети, подключенной к  $i$ -му узлу. После выполнения оптимизационных расчетов для питающей сети будет выяснена целесообразная мощность компенсирующих устройств для установки в  $i$ -м узле. Тогда остается выяснить, какая часть этой мощности должна быть рассредоточена по распределительной сети, а какая — установлена непосредственно в  $i$ -м узле питающей сети.

Если полученная мощность для  $i$ -го узла питающей сети  $Q_{Ki} \leq Q_{Ki \text{ макс}}$  (рис. 8), где  $Q_{Ki \text{ макс}}$  — мощность компенсирующих устройств, дающая наибольший доход в  $i$ -й распределительной сети, то всю мощность  $Q_{Ki}$  следует рассредоточить по распределительной сети. В том случае, если окажется, что  $Q_{Ki} > Q_{Ki \text{ макс}}$ , то мощность  $Q_{Ki \text{ макс}}$  целесообразно рассредоточить по распределительной сети, а оставшуюся мощность  $Q_{Ki} - Q_{Ki \text{ макс}}$  подключить непосредственно в  $i$ -м узле питающей сети.

## Лекция № 4

## ВЫБОР УСТРОЙСТВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКАМИ МОЩНОСТИ В ЗАМКНУТЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Замкнутые электрические сети, как правило, являются неоднородными, характеризующимися различным отношением  $X_i/R_i$ , на участках. При одинаковом напряжении участков сети неоднородность сети объясняется применением различных площадей сечений. Однако наибольшая неоднородность проявляется в контурах, содержащих различные номинальные напряжения. Так, если в контуре имеются линии напряжением 500 и 220 кВ, то  $\frac{X_{500}}{R_{500}} > \frac{X_{220}}{R_{220}}$ . Например, при марках провода АС 3 × 400/51 линии 500 кВ и АС

400/51 линии 220 кВ будем иметь соотношение  $\frac{0,306}{0,025} > \frac{0,42}{0,075}$ , т. е.  $12,2 > 5,6$ . Еще большую неоднородность вносят трансформаторы, соединяющие в контуре линии различных напряжений. Например, автотрансформатор АТДЦТН-500000/500/220 имеет отношение  $\frac{X_T}{R_T} = \frac{57,5}{2,1} = 27,4$ .

В главе 7 было показано, что если замкнутый контур без ЭДС разрезать по источнику питания, то получим линию с двусторонним питанием с источниками по концам А и Б (рис. 9). Для такой линии естественная мощность, выходящая от источника А

$$\underline{S}_{Ac} = \frac{\sum_{i=1}^n \underline{S}_i Z_{iB}}{Z_{AB}}, \quad (21)$$

где  $\underline{S}_i$  — мощность в  $i$ -м узле;  $Z_{iB}$  — сопротивление ветвей от  $i$ -го узла до источника Б;  $Z_{AB}$  — сопротивление контура;  $n$  — число нагрузочных узлов в контуре.

Для однородной сети соответственно было получено:

$$\underline{S}_{Ac} = \frac{\sum_{i=1}^n \underline{S}_i R_{iB}}{R_{AB}}, \quad (22)$$

т. е. мощности распределяются аналогичным образом, но в соответствии с активными сопротивлениями  $R$ .

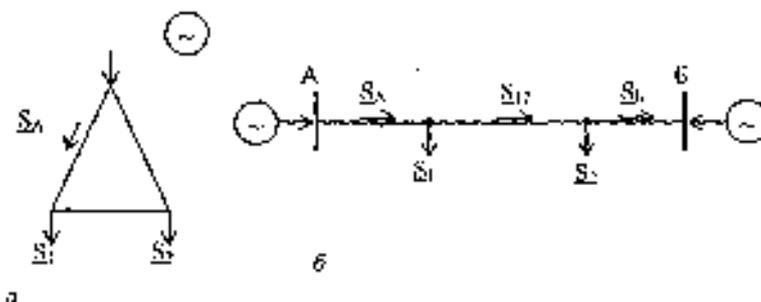


Рис. 9. Схема сети: *a* — замкнутая; *б* — разрезанная по источнику питания

Потери мощности в сети можно представить так:

$$\Delta P = (S_A^2 R_{A1} + S_{12}^2 R_{12} + S_B^2 R_{B2}) \frac{1}{U_{\text{НОМ}}^2}. \quad (23)$$

Выразим мощности  $S_{12}$  и  $S_B$  через мощность  $S_A$  и мощности нагрузок  $S_1$  и  $S_2$ .

$$\left. \begin{aligned} S_{12} &= S_A - S_1; \\ S_B &= S_A - S_1 - S_2. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Подставим выражения (24) в формулу (23), заменив полные мощности через соответствующие активные и реактивные:

$$\Delta P = \left\{ (P_A^2 + Q_A^2) R_{A1} + ((P_A - P_1)^2 + (Q_A - Q_1)^2) R_{12} + ((P_A - P_1 - P_2)^2 + (Q_A - Q_1 - Q_2)^2) R_{B2} \right\} \frac{1}{U_{\text{НОМ}}^2}.$$

Найдем экономичные мощности  $P_{A0}$  и  $Q_{A0}$ , соответствующие минимуму потерь активной мощности. Для этого возьмем частные производные по  $P_A$  и  $Q_A$  и приравняем их нулю:

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial P_A} = 0, \quad \frac{\partial \Delta Q}{\partial Q_A} = 0.$$

После преобразований получим:

$$\left. \begin{aligned} P_{A0} &= \frac{P_1(R_{12} + R_{B2}) + P_2 R_{B2}}{R_{AB}}; \\ Q_{A0} &= \frac{Q_1(R_{12} + R_{B2}) + Q_2 R_{B2}}{R_{AB}}. \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Эти выражения можно записать через полные мощности:

$$S_{A0} = \frac{S_1(R_{12} + R_{B2}) + S_2 R_{B2}}{R_{AB}}. \quad (26)$$

В общем случае

$$S_{A0} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i R_{iB}}{R_{AB}}, \quad (27)$$

Сравнение выражений (21) и (27) показывает, что естественное распределение мощностей не совпадает с экономичным. В то же время сравнение выражений (22) и (27) свидетельствует о том, что в однородной сети естественное распределение мощностей одновременно является экономичным. Таким образом, можно сделать вывод о том, что неоднородность сети вызывает в контуре уравнительную мощность

$$\underline{S}_y = \underline{S}_{Ae} - \underline{S}_{Aз},$$

которая приводит к перераспределению потоков мощности по ветвям и увеличению потерь мощности. Отсюда следует, что для перехода от режима сети с естественным распределением мощностей к экономичному режиму необходимо в контуре компенсировать уравнительную мощность  $\underline{S}_y$ . Это можно сделать, создав в контуре принудительную уравнительную мощность  $\underline{S}_{y.п.}$ , направленную навстречу  $\underline{S}_y$ :

$$\underline{S}_{y.п.} = -\underline{S}_y = \underline{S}_{Aз} - \underline{S}_{Ae} = P_{y.п.} + jQ_{y.п.} = (P_з - P_e) + j(Q_з - Q_e). \quad (28)$$

Для получения мощности  $\underline{S}_{y.п.}$  в контур необходимо ввести соответствующую ЭДС  $E_з$ . Тогда

$$\underline{S}_{y.п.} = \sqrt{3}U \dot{I}_{y.п.} = \frac{UE_з}{Z_k},$$

где  $Z_k$  — сопротивление контура. Отсюда требуемая ЭДС

$$\dot{E}_з = E_з' - jE_з'' = \frac{\underline{S}_{y.п.} \dot{Z}_k}{U} = \frac{(P_{y.п.} + jQ_{y.п.})(R_k - jX_k)}{U}$$

После преобразований получим продольную  $E_з'$  и поперечную  $E_з''$  ЭДС, которые необходимо создать в контуре для получения экономичного распределения мощностей

$$E_з' = \frac{P_{y.п.}R_k + Q_{y.п.}X_k}{U}; \quad (29)$$

$$E_з'' = \frac{P_{y.п.}X_k - Q_{y.п.}R_k}{U} \quad (30)$$

Для питающих (системообразующих) сетей напряжением 110 кВ и выше  $X \gg R$ . Поэтому, если полагать, что  $R \approx 0$ , то составляющие ЭДС будут равны:

$$E_з' \approx \frac{Q_{y.п.}X_k}{U}; \quad (31)$$

$$E_з'' \approx \frac{P_{y.п.}X_k}{U}. \quad (32)$$

Пример создания положительных ЭДС  $E_з'$  и  $E_з''$  показан на рис. 10, а, где  $U$  — напряжение с учетом воздействия ЭДС.

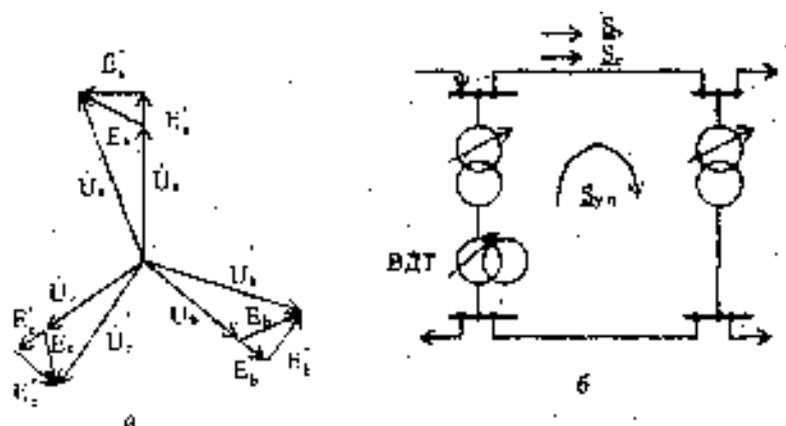


Рис. 10. Векторная диаграмма с ЭДС (а) и схема неоднородной замкнутой сети (б)

Из формул (31) и (32) можно записать:

$$Q_{y,n} = \frac{UE_2'}{X_k}; \quad (33)$$

$$P_{y,n} = \frac{UE_3''}{X_k}; \quad (34)$$

Отсюда следует, что введение в контур продольной ЭДС в основном оказывает влияние на перераспределение реактивных мощностей, а поперечной ЭДС — на перераспределение активных мощностей.

ЭДС в контуре создается, трансформаторами, включенными в данный контур. Если в контуре содержится один трансформатор, то

$$\mathbf{E} = \mathbf{U}_0 - \mathbf{k}_T \mathbf{U}_0 = \mathbf{U}_0(1 - \mathbf{k}_T),$$

где  $U_0$  — напряжение опорного узла;  $k_T$  — коэффициент трансформации трансформатора, учитывающий изменение величины и фазы напряжения.

Если в один и тот же контур включено  $n$  трансформаторов, то

$$\mathbf{E} = \mathbf{U}_0(1 - \prod_{i=1}^n \mathbf{k}_{Ti}), \quad (35)$$

где коэффициенты трансформации подставляются по направлению обхода контура.

Для создания продольной ЭДС достаточно иметь обычные трансформаторы (автотрансформаторы) с ответвлениями. В этом случае

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}' = \mathbf{U}_0(1 - \prod_{i=1}^n \mathbf{k}_{Ti}). \quad (36)$$

При этом трансформаторы с регулированием напряжения под нагрузкой позволяют получить в контуре регулируемую ЭДС.

Для создания поперечной или продольно-поперечной ЭДС применяют специальные вольтодобавочные трансформаторы (ВДТ). Пример включения их в контур показан на рис. 10, б.

Конкретный выбор числа и мест установки трансформаторов поперечного регулирования в замкнутой электрической сети с многими контурами и несколькими номинальными напряжениями представляет собой достаточно сложную задачу проектирования. Рассмотрим один из возможных алгоритмов решения данной задачи:

1) на основании расчетов режимов сети определяют естественное и экономичное распределение мощностей при номинальных коэффициентах трансформации трансформаторов связи;

2) находят по формуле (28) требуемые принудительные уравнительные мощности а независимых контурах;

3) находят по формулам (29) и (30) параметры устройств продольно-поперечного регулирования для каждого независимого контура, при этом установку этих устройств предусматривают в цепях трансформаторов связи;

4) вводят поочередно устройства продольно-поперечного (поперечного) регулирования в каждый контур и определяют экономическую эффективность «ега» установки. При этом для создания продольной ЭДС максимально используют возможности устройств регулирования напряжения под нагрузкой трансформаторов связи. Установка дополнительного устройства экономически целесообразна, если выполняется условие:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=1}^T \frac{Z_{\text{эт}} - I_{\text{у.п.р.т}} - K_{\text{у.п.р.т}}}{(1+E)^t} > 0, \quad (37)$$

где  $Z_{\text{эт}}$  — доход, характеризующийся эффектом от снижения потерь электроэнергии в сети в год  $t$ ;  $I_{\text{у.п.р.т}}$ ,  $K_{\text{у.п.р.т}}$  — годовые издержки и капитальные затраты на дополнительное устройство поперечного регулирования в год  $t$ ;

5) принимают к установке устройство поперечного регулирования, дающее наибольшее значение

$$\text{ЧДД} = \max$$

6) расчеты по пп. 1—5 с учетом ранее выбранных устройств поперечного регулирования повторяют до тех пор, пока соблюдается условие (37);

7) находят срок окупаемости каждого из дополнительных устройств поперечного регулирования и в зависимости от его численного значения принимают решение о целесообразности применения данного устройства.

В связи с тем, что наибольшее снижение потерь мощности может иметь место как в режиме наибольших нагрузок, так и в других режимах энергосистемы, параметры устройств поперечного регулирования приходится выбирать на основе анализа ряда характерных режимов и их продолжительности. Учет динамики нагрузок и схемы сети во времени также создает дополнительные затруднения при выборе рациональных мест установки и параметров устройств поперечного регулирования.

В связи с тем, что в однородных замкнутых сетях естественное распределение мощностей совпадает с экономичным, переход к экономичному режиму возможен также путем настройки сети на однородную. Отметим, однако, что такой способ мало пригоден для сложнзамкнутой сети. Он может быть

рассмотрен применительно к одному контуру либо к двум параллельным воздушной и кабельной линиям (рис. 11).

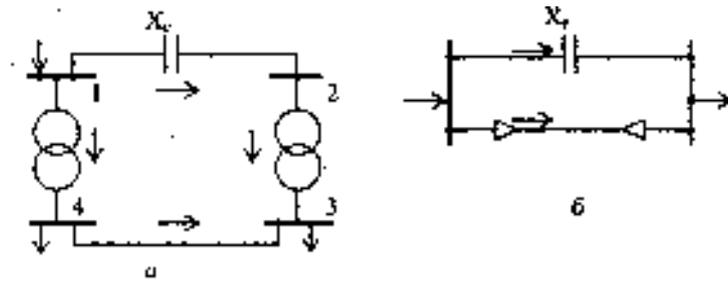


Рис. 11. Схемы неоднородных сетей:  
а — замкнутой; б — с двумя параллельными линиями

Пусть на участке 123 (рис. 11, а) отношение индуктивного сопротивления к активному больше аналогичного отношения на участке 143:

$$\frac{X_{123}}{R_{123}} > \frac{X_{143}}{R_{143}}.$$

Для создания однородной сети включим в линию 12 устройство продольной компенсации с сопротивлением  $X_c$  такой величины, чтобы

$$\frac{X_{123} - X_c}{R_{123}} = \frac{X_{143}}{R_{143}}$$

Отсюда для настройки сети на однородную емкостное сопротивление  $X_c$  должно быть равно

$$X_c = X_{123} - R_{123} \frac{X_{143}}{R_{143}} \quad (38)$$

Целесообразность такого решения проверяется по критерию чистого дисконтированного дохода (13.37), в котором учитываются годовые издержки и капитальные затраты на устройство продольной компенсации.