

Лекция № 2

ПОДХОДЫ К ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПРОТЯЖЕННЫХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Под протяженными будем понимать электропередачи длиной более 300 км. Также электропередачи, как уже отмечалось в главе 1, являясь составной частью систем передачи электроэнергии, могут выполнять следующие функции:

- передача больших мощностей от удаленных электростанций к системным подстанциям и центрам потребления;
- транзитная или реверсивная передача мощности из одной части системообразующей сети в другую при параллельной работе с шунтируемой сетью более низкого номинального напряжения;
- осуществление связей между собой отдельных внутригосударственных и межгосударственных энергосистем.

Важнейшим фактором при выборе и оптимизации параметров протяженных электропередач является их пропускная способность, которая обычно и выступает в качестве критерия оптимизации. Все остальные факторы при оптимизации проектных параметров и эксплуатационных режимов являются дополнительными, направленными на достижение основной задачи обеспечения заданной пропускной способности наилучшим образом. Пропускная способность преимущественно ограничивается пределом передаваемой мощности по условию статической устойчивости генераторов электростанций, связываемых данной электропередачей. Для идеализированной электропередачи (без потерь) предел передаваемой мощности определяется выражением (1):

$$P_{\text{пр}} = \frac{EU}{X_{\Sigma}}, \quad (1)$$

где E — ЭДС генераторов, работающих на данную электропередачу; U — напряжение на шинах приемной системы; X_{Σ} — суммарное реактивное сопротивление, включающее сопротивление генераторов, которое зависит от вида их систем возбуждения, трансформаторов передающего и приемного концов и собственно линии электропередачи.

Отсюда видно, что основная характеристика электропередачи — пропускная способность — зависит не только от параметров элементов электропередачи но и связана с генераторами электростанций. В случае сильного регулирования возбуждения генераторов, обеспечивающего неизменные напряжения по концам линии, предел передаваемой мощности представляется в виде:

$$P_{\text{пр}} = \frac{U_1 U_2}{X_{\text{л}}} = \frac{U_1 U_2}{Z_{\text{в}} \sin \alpha_0 L}. \quad (2)$$

Полагая $U_1 = U_2$, приближенно можно записать:

$$P_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{Z_{\text{в}} \sin \alpha_0 L} = \frac{P_{\text{нат}}}{\sin \alpha_0 L}. \quad (3)$$

Отсюда следует важный вывод о том, что предельная мощность пропорциональна абсолютному значению натуральной мощности и уменьшается с увеличением длины линии. Из формул (1) — (3) следует, что пропускная способность электропередачи существенно зависит от номинального напряжения, т. к. она пропорциональна квадрату напряжения. Однако такой путь повышения пропускной способности ограничивается экономическими соображениями, т. к. при увеличении минимального напряжения возрастают капитальные затраты в линию, трансформаторы, коммутационные аппараты и другое электрооборудование. Поэтому оптимизация такого параметра электропередачи, как номинальное напряжение, должна осуществляться применением экономических критериев.

Другой путь повышения пропускной способности, как следует из формулы (2) (3), заключается в воздействии на такие параметры линии как волновое сопротивление и волновая длина линии:

$$Z_{\text{в}} = \sqrt{\frac{X_0}{B_0}} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}, \quad (4)$$

$$\lambda = \alpha_0 L = L \sqrt{X_0 B_0} = L \omega \sqrt{L_0 C_0}. \quad (5)$$

При этом следует стремиться уменьшить волновое сопротивление, волновую длину или одновременно оба этих параметра.

Можно выделить следующие основные принципы компенсаций линии электропередачи:

- компенсация к натуральному режиму;
- компенсация волновой длины λ ;
- компенсация волнового сопротивления.

Как следует из формулы (5), волновую длину линии можно уменьшить путем включения последовательно с линией емкостей для компенсации индуктивного сопротивления (рис. 1, а) или индуктивностей параллельно с линией для компенсации емкостной проводимости (рис. 1, б). При этом в первом случае волновое сопротивление будет уменьшаться, а во втором — увеличиваться:

$$Z_{\text{в.прод}} = \sqrt{\frac{X_0 - x_c}{B_0}} < Z_{\text{в}},$$

$$Z_{\text{в.попер}} = \sqrt{\frac{X_0}{B_0 - b_L}} > Z_{\text{в}},$$

где x_c , b_1 . — соответственно сопротивление устройства продольной и проводимость устройства поперечной компенсации на единицу длины линии.

Очевидно, что в принципе может быть одновременно применена компенсация как индуктивного сопротивления, так и емкостной проводимости (рис. 1, в).

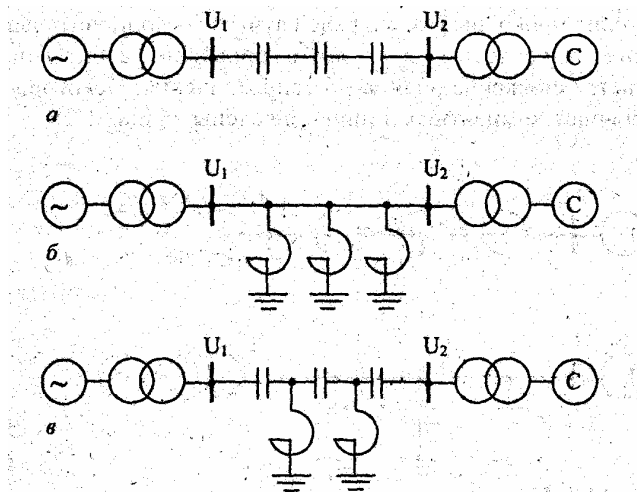


Рис. 1. Схемы компенсации волновой длины линии:
 а - устройствами продольной емкостной компенсации,
 б-устройствами поперечной индуктивной компенсации;
 в - устройствами продольной и поперечной компенсации.

С помощью изменения волновой длины можно получить полуволновую линию, для которой $\lambda = \pi$, что соответствует длине линии 3000 км. Для этого необходимо последовательно с линией включить индуктивности (рис. 2, а) или параллельно с линией емкости (рис. 2, б).

При этом волновое сопротивление в первом случае увеличится, а во втором — уменьшится:

$$Z_{\text{в.прод}} = \sqrt{\frac{X_0 + x_L}{B_0}} > Z_{\text{в}},$$

$$Z_{\text{в.попер}} = \sqrt{\frac{X_0}{B_0 + b_c}} < Z_{\text{в}}.$$

Проведенные исследования, однако, показали, что более эффективным принципом компенсации параметров линии, позволяющим повысить пропускную способность, является компенсация волнового сопротивления линии. Для его реализации используется, прежде всего, такое относительно простое конструктивное решение, как расщепление фаз. При этом уменьшается индуктивность линия и одновременно увеличивается емкость, что приводит к снижению волнового сопротивления. Другой путь уменьшения волнового сопротивления заключается в применение различных технических решений

электропередач повышенной натуральной мощности, в основе которых лежат компактные воздушные линии. Они предполагают сближение проводов фаз, а в ряде случаев — дополнительно специальные расположения относительно друг друга проводов, расщепленных фаз. В результате достигается снижение волнового сопротивления. Некоторые примеры расположения проводов компактных линий приведенных на рис. 1.28.

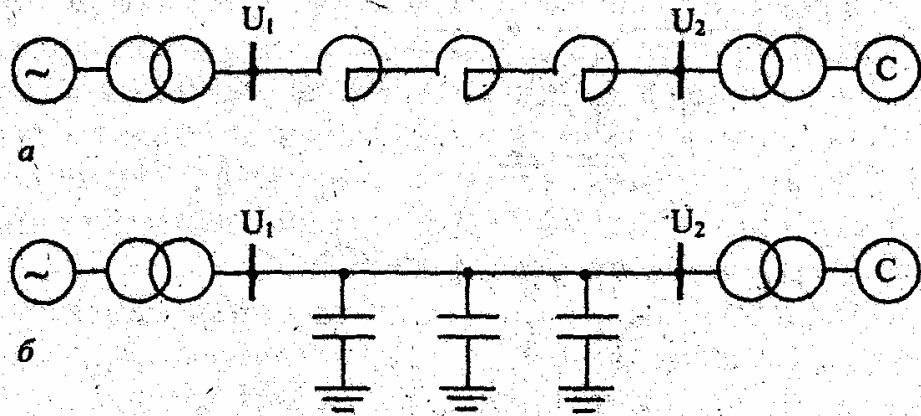


Рис. 2. Принципы настройки линии на полуволну:
 а - устройствами продольной индуктивной компенсации;
 б - устройствами поперечной емкостной, компенсации.

Волновое сопротивление линии можно также уменьшить, применив сосредоточенные устройства продольной емкостной (рис. 1, а), либо поперечной емкостной (рис. 2, б) компенсации.

Другая важная задача при выборе и оптимизации параметров, мощных протяженных электропередач связана с тем, что они, как правило, работают с переменной во времени нагрузкой. Поэтому если параметры выбраны для обеспечения заданной пропускной способности в режиме наибольших нагрузок, то в других режимах, особенно в жиме наименьших нагрузок и при холостом ходе, напряжения вдоль линии могут задаться за допустимыми пределами. Причиной этого является превышение мощности линии над потерями реактивной мощности при работе линии с нагрузкой меньше натуральной. Поэтому может быть привлекателен принцип компенсации метров линии электропередачи к натуральному, режиму близкому к нему. Однако для создания такого режима во всем диапазоне заданных передаваемых по линии мощностей требуются регулируемые устройства. Небаланс реактивной мощности в линии может быть записан в виде: мощностей:

$$\delta Q = Q_c - \Delta Q = 3\omega C_0 U_\phi^2 L - 3\omega L_0 I^2 L.$$

В натуральном режиме $Q_c = \Delta Q$ и $\delta Q = 0$.

При токе нагрузки $I = 0$ будет иметь место только зарядная мощность Q_c , которая в режиме холостого хода направлена от разомкнутого конца линии в точку подключения линии к сети. При этом напряжение на разомкнутом конце линии будет повышаться. Для его ограничения при определенных длинах L и более приходится устанавливать шунтирующие реакторы, компенсирующие

избыточную емкость, но схеме, приведенной на рис. 1, б. Однако, если шунтирующие реакторы выполнить нерегулируемыми, то эквивалентная емкость линии уменьшится во всех нагрузочных режимах и, как следует из формулы (4), уменьшится эквивалентное волновое сопротивление, что приведет к снижению пропускной способности. Для того чтобы этого не произошло, шунтирующие реакторы должны быть регулируемыми, т.е. позволять изменять их мощность в соответствии с передаваемой мощностью и настраивать линию на режим, близкий к режиму натуральной мощности. Данное требование о регулируемых шунтирующих реакторах особенно актуально для компактных линий, которые обладают повышенной емкостью.

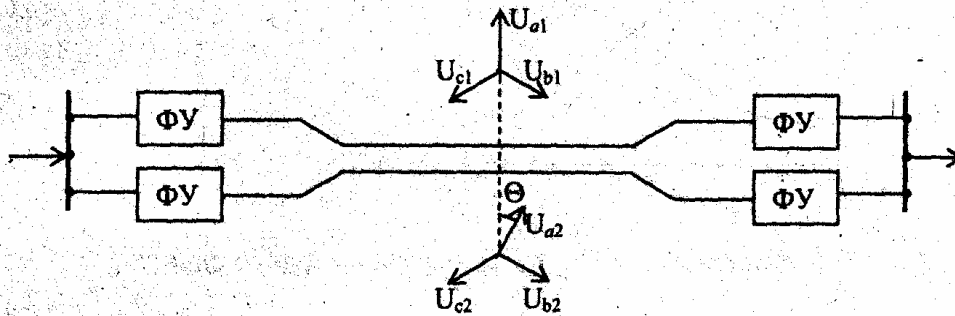


Рис. 3. Схема электропередачи с фазовым сдвигом

Возможны также и другие способы компенсации параметров линии к натуральному режиму. Так, в двухцепных электропередачах с фазовым сдвигом, идея которых предложена в Московском энергетическом институте, фазы сближаются одной от каждой цепи до минимально допустимого расстояния, а к цепям прижаты системы напряжений, сдвинутые относительно друг друга на определенный угол ϑ , регулируемый с помощью специальных фазорегулирующих устройств ФУ (рис. 3). Некоторые возможные варианты взаимного расположения вводов расщепленных фаз, выполненных по данной идее, приведены на рис. 4. При угле $\Theta = 180^\circ$ в таких электропередачах эквивалентное волновое сопротивление $Z_{вз}$ оказывается наименьшим, а натуральная мощность — наибольшей.

И наоборот, при угле $\Theta = 0$, эквивалентное волновое сопротивление имеет наибольшее значение, а натуральная мощность — наименьшее. Таким образом, при наибольших нагрузках следует создавать режим с углом фазового сдвига $\Theta = 180^\circ$, а при наименьших — с меньшим углом вплоть до $\Theta = 0$. В результате можно добиться того, что при любой нагрузке линии она будет работать в режиме, близком к натуральному.