

Установившиеся режимы работы электроэнергетических систем с сетевыми устройствами гибких электропередач

ШАКАРЯН Ю.Г., ФОКИН В.К., ЛИХАЧЕВ А.П.

На примере электроэнергетической системы (ЭЭС) простой структуры представлены ее аналитические режимные характеристики и возможности при наличии устройств Flexible AC Transmission System (FACTS) параллельного и последовательного включения в различных точках электропередачи. При относительно равном влиянии на ЭЭС проведено сопоставление требуемых номинальных мощностей как между параллельно и последовательно включенными устройствами FACTS, так и между различными типами устройств в рамках отдельно параллельной или последовательной компенсации.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, установившиеся режимы, регулирование реактивной мощности, пропускная способность электропередачи

Несмотря на достаточно большое число публикаций по теории и практике применения устройств FACTS в электроэнергетических системах [1–6], по нашему мнению, существует необходимость систематического изложения теоретических положений и соответствующих аналитических соотношений, позволяющих с единой позиции сравнить свойства и характеристики электропередач с устройствами FACTS. Необходимость такого исследования подтверждается также наметившейся тенденцией широкого практического применения данных устройств в ЭЭС России в ближайшей перспективе [7].

В планируемое исследование входят рассмотрение устройств технологии FACTS скалярного и векторного типов регулирования с точки зрения влияния на статическую и динамическую устойчивость ЭЭС и перераспределение потоков мощности.

Представленные материалы являются первой частью этого исследования и содержат сведения об основных свойствах и характеристиках установившихся режимов электропередачи с последовательно и параллельно включенными в линию устройствами FACTS. Рассматриваются как индуктивно-емкостные устройства (статические тиристорные компенсаторы – СТК, управляемые устройства продольной компенсации – УУПК и др.), электрические машины (синхронные и асинхронизированные компенсаторы – СК и АСК), так и устройства, полностью основанные на запираемых приборах силовой электроники (статические компенсаторы

The analytical operating characteristics and capacities of an electric power system equipped with Flexible AC Transmission System (FACTS) devices connected at different points of a power transmission system according to shunt- and series-connection arrangements are presented taking an electric power system of simple structure as an example. The required capacities of shunt- and series-connected FACTS devices having relatively equal effects on the power system, as well as different types of devices used within separate shunt- and series-connected compensation systems are compared with each other.

Key words: electric power system, reactive power control, power line transmission capacity

– СТАТКОМ). Для получения наглядных соотношений анализируется электроэнергетическая система простой структуры (эквивалентный генератор – линия электропередачи – шины бесконечной мощности), содержащая упомянутые устройства.

Устройства параллельного включения. Такие устройства как управляемые шунтирующие реакторы (УШР) с конденсаторной батареей, СТК, СК (АСК), СТАТКОМ, включенные параллельно по отношению к линии в каких-либо промежуточных ее точках, могут поддерживать требуемое напряжение в точке включения, что позволяет увеличить пропускную способность электропередачи. В зависимости от типа, мощности и места включения параллельного устройства FACTS в линию электропередачи характеристики активной мощности по ней варьируются, что исследуется ниже.

Индуктивно-емкостные устройства параллельного включения. Схема замещения исследуемой электропередачи без учета емкостной проводимости линии при включении в произвольной промежуточной точке параллельного устройства FACTS и векторная диаграмма напряжений и токов для этого случая показаны на рис. 1. В качестве индуктивно-емкостного устройства может быть управляемый шунтирующий реактор (УШР) с параллельной конденсаторной батареей или статический тиристорный компенсатор (СТК) с управляемой частью, которая эквивалентруется переменной емкостью x_k . Вектор U_2 принят в качестве базисного и балансирующего ($d_2 = 0$ и $d_1 = d$).

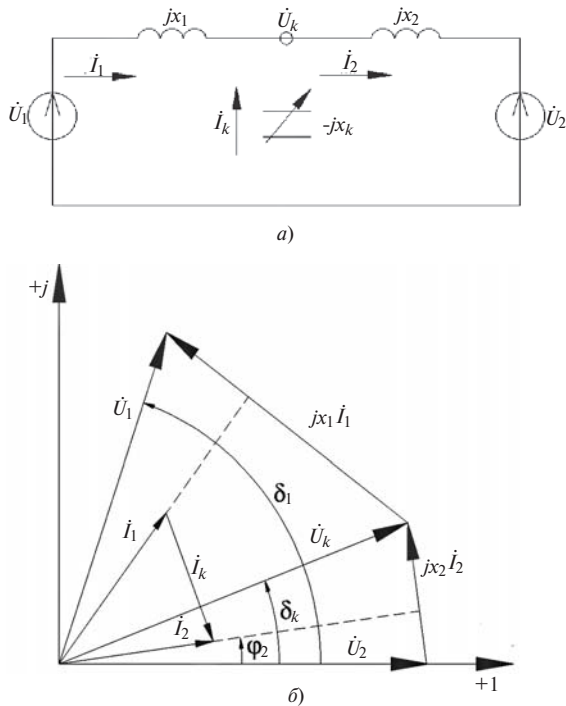


Рис. 1. Схема замещения (а) и векторная диаграмма (б) рассматриваемой электропередачи

Уравнения установившегося режима рассматриваемой электропередачи в системе относительных единиц (отн. ед.), где за базисные величины приняты напряжение и мощность эквивалентного генератора, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} U_1 &= jx_k I_k + jx_1 I_1; \\ U_2 &= jx_k I_k - jx_2 I_2; \\ U_k &= jx_k I_k; \end{aligned} \quad (1)$$

откуда легко представить выражения для токов линии I_1 , I_2 , параллельного устройства FACTS (СТК) I_k и напряжения U_k в узле подключения последнего:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{j(x_2 - x_k)U_1 + jx_2 U_2}{x_k(x_1 + x_2) - x_1 x_2}; \\ I_2 &= \frac{-j(x_1 - x_k)U_2 + jx_k U_1}{x_k(x_1 + x_2) - x_1 x_2}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} I_k &= -\frac{jx_1 U_2 + jx_2 U_1}{x_k(x_1 + x_2) - x_1 x_2}; \\ U_k &= -\frac{x_k(x_1 U_2 + x_2 U_1)}{x_k(x_1 + x_2) - x_1 x_2}; \\ \left| \frac{U_k}{U_1} \right| &= \frac{x_k \sqrt{x_1^2 U_2^2 + x_2^2 U_1^2 + 2x_1 x_2 U_1 U_2 \cos d}}{x_k(x_1 + x_2) - x_1 x_2}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} d_k = \frac{x_2 U_1 \sin d}{x_2 U_1 \cos d + x_1 U_2}.$$

Принимается, что мощность СТК обеспечивает поддержание заданного значения напряжения U_k в узле его подключения. Из (3), задавая требуемое значение U_k , можно определить необходимое значение x_k для выполнения данного условия. Для этого решается квадратное уравнение относительно искомого параметра:

$$\begin{aligned} &x_k^2 [x_1^2 (U_k^2 - U_2^2) + x_2^2 (U_k^2 - U_1^2) + 2x_1 x_2 (U_k^2 - \\ &- U_1 U_2 \cos d)] - 2x_k x_1 x_2 (x_1 + x_2) U_k^2 + \\ &+ x_1^2 x_2^2 U_k^2 = 0; \\ &x_k = \frac{2x_1 x_2 (x_1 + x_2) U_k^2 + \sqrt{4x_1^2 x_2^2 (x_1 + x_2)^2 U_k^4 - \\ &- 4x_1^2 x_2^2 U_k^2 [x_1^2 (U_k^2 - U_2^2) + x_2^2 (U_k^2 - U_1^2) + \\ &+ x_2^2 (U_k^2 - U_1^2) + \\ &+ 2x_1 x_2 (U_k^2 - U_1 U_2 \cos d)]}}{2[x_1^2 (U_k^2 - U_2^2) + \\ &- 4x_1^2 x_2^2 U_k^2 [x_1^2 (U_k^2 - U_2^2) + x_2^2 (U_k^2 - U_1^2) + \\ &+ x_2^2 (U_k^2 - U_1^2) + \\ &+ 2x_1 x_2 (U_k^2 - U_1 U_2 \cos d)]}} \end{aligned} \quad (4)$$

или для частного случая $\left| \frac{U_1}{U_2} \right| = \left| \frac{U_2}{U_1} \right| = \left| \frac{U_k}{U_1} \right| = U_{\text{ном}} = U$

$$x_k = \frac{x_1 + x_2 + \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + 2x_1 x_2 \cos d}}{2(1 - \cos d)}. \quad (5)$$

Задавая $U_k = U e^{jd_k}$, получаем достаточно удобные формулы для вычисления токов и мощностей в исследуемой системе:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{2U}{x_1} \sin \frac{d - d_k}{2} e^{j \frac{d + d_k}{2}}; \\ I_2 &= \frac{2U}{x_2} \sin \frac{d_k - d}{2} e^{j \frac{d_k}{2}}; \\ I_k &= \frac{U}{jx_k} = \frac{2U(1 - \cos d)}{x_1 + x_2 + \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + 2x_1 x_2 \cos d}} e^{j(d_k - 90)}. \end{aligned} \quad (6)$$

В представленных формулах фаза тока каждого отрезка линии равна половине угла электропередачи данного отрезка, что является следствием равенства напряжений по его концам.

Выражение для угловой характеристики активной мощности электропередачи $P(d)$ при $\left| \frac{U_1}{U_2} \right| = \left| \frac{U_2}{U_1} \right| = U$ имеет следующий вид:

$$P = \operatorname{Re}(U_1 I_1) = \frac{U^2}{x_{12}} \sin d = \frac{U^2}{x_1 + x_2 - \frac{x_1 x_2}{x_k}} \sin d =$$

$$= \frac{U^2}{x_1} \sin(d - d_k) = \frac{U^2}{x_2} \sin d_k, \quad (7)$$

где x_{12} — взаимное сопротивление между узлами 1 и 2:

$$x_{12} = x_1 + x_2 - \frac{x_1 x_2}{x_k}. \quad (8)$$

Из (7) видно, что при включении в какую-либо промежуточную точку линии поперечного устройства FACTS, способного поддерживать напряжение в данной точке равным $\left| \frac{\&}{U_k} \right| = U_{\text{ном}} = U$ во всех режимах работы линии, пропускная способность всей линии при этом будет определяться пропускной способностью наиболее длинного участка, т.е. x_1 или x_2 (см. (7)). Реактивная мощность СТК, требуемая для выполнения условия $\left| \frac{\&}{U_k} \right| = U$, определяется следующим выражением:

$$Q_k = \text{Im}(U_k I_k) = \frac{2U^2(1 - \cos d)}{x_1 + x_2 + \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + 2x_1 x_2 \cos d}}. \quad (9)$$

Особый интерес представляет случай установки СТК в середине линии ($x_1 = x_2 = x$), так как при этом будет наибольшая пропускная способность рассматриваемой электропередачи. В этом случае из (3) следует, что $d_k = d/2$, а формулы (6) принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{2U}{x} \sin \frac{e^{-j\frac{d}{4}} - e^{j\frac{d}{4}}}{e^{-j\frac{d}{4}} + e^{j\frac{d}{4}}}; \\ I_2 &= \frac{2U}{x} \sin \frac{e^{j\frac{d}{4}} - e^{-j\frac{d}{4}}}{e^{j\frac{d}{4}} + e^{-j\frac{d}{4}}}; \end{aligned} \quad (6a)$$

$$I_k = I_2 - I_1 = \frac{2U}{x} (1 - \cos(d/2)) e^{j(\frac{d}{2} - 90^\circ)}.$$

Реактивное сопротивление СТК

$$x_k = \frac{x}{2(1 - \cos(d/2))}. \quad (10)$$

Взаимное сопротивление (8) с учетом $x_1 = x_2 = x$ и (10)

$$x_{12} = 2x \cos(d/2). \quad (11)$$

Выражение для характеристики активной мощности (7) с учетом (11) при $\left| \frac{\&}{U_1} \right| = \left| \frac{\&}{U_2} \right| = \left| \frac{\&}{U_k} \right| = U_{\text{ном}} = U$ можно записать в следующем виде:

$$P = \frac{U^2}{x_{12}} \sin d = \frac{U^2}{2x \cos(d/2)} \sin d, \quad (12)$$

и после тригонометрического преобразования

$$P = \frac{U^2}{x} \sin(d/2) = P_{\text{max}} \sin(d/2) = 2P_{\text{max}0} \sin(d/2), \quad (13)$$

а реактивная мощность СТК определяется по формуле

$$Q_k = \frac{2U^2}{x} (1 - \cos(d/2)) = 2P_{\text{max}} (1 - \cos(d/2)). \quad (14)$$

В данном случае максимальная передаваемая мощность P_{max} с учетом рассматриваемого СТК при $d_k = 90^\circ$ и, соответственно при $d = 180^\circ$ в 2 раза больше максимальной мощности электропередачи без этого устройства ($P_{\text{max}0} = \frac{U^2}{2x}$), при этом требуемая реактивная мощность СТК

$$Q_{k \text{ max}} = \frac{2U^2}{x} = 2P_{\text{max}} = 4P_{\text{max}0}.$$

На рис. 2 в качестве примера представлены основные зависимости $P, Q_k = f(d)$ для электропередачи 500 кВ длиной 667 км, $x_{12} = 200$ Ом = 0,8 отн. ед. с базисными параметрами: $U_{\text{баз}} = 500$ кВ, $S_{\text{баз}} = 1000$ МВА и $Z_{\text{баз}} = 250$ Ом при $\left| \frac{\&}{U_{1*}} \right| = \left| \frac{\&}{U_{2*}} \right| =$

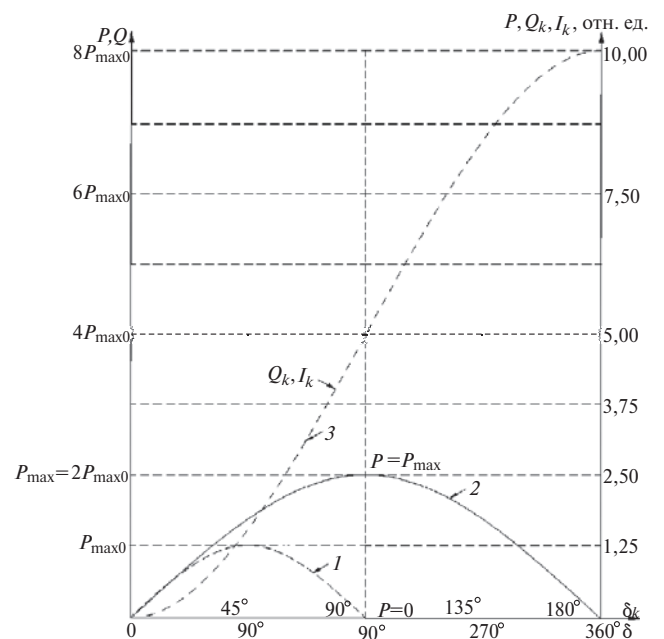


Рис. 2. Зависимости $P, Q_k = f(d)$: 1 — угловые характеристики рассматриваемой электропередачи без СТК [$P(Q_k = 0)$]; 2 — характеристика активной мощности при подключении СТК в середине линии ($x_1 = x_2 = x$) при

$$= \left| \frac{\&}{U_{k*}} \right| = U_{\text{ном}*} = U_* = 1 \text{ и } x_{1*} = x_{2*} = x_{\text{л}} / 2 = x_* = 0,4$$

отн. ед.

С увеличением угла электропередачи d растет и требуемое значение реактивной мощности Q_k . Так, при углах электропередачи на интервале $180^\circ < d < 360^\circ$ с построением угловой характеристики $P(d)$ при условии $\left| \frac{\&}{U_1} \right| = \left| \frac{\&}{U_2} \right| = \left| \frac{\&}{U_k} \right| = U_{\text{ном}} = U$ требуется дальнейшее увеличение Q_k от $2P_{\text{max}}$ при $d = 180^\circ$ до $4P_{\text{max}}$ при угле $d = 360^\circ$, как это видно из рис. 2.

Если мощность параллельного компенсирующего устройства ограничена значением $Q_{k\text{max}} < \frac{2U^2}{x} = 2P_{\text{max}}$, то угловые характеристики мощности электропередачи $P(d)$ имеют вид, показанный на рис. 3. При этом участки характеристики $0-I$, $0-I\phi$ и т.д. соответствуют выражению (13) (на этом участке выполняются условия $U_1 = U_2 = U_k = U$ при $x_1 = x_2 = x$), а участки $I-180^\circ$, $I\phi-180^\circ$ и т.д. — формуле (12), в которой $x_{12} = 2x \cos(d_0 / 2) = \text{const}$, соответственно $x_k = \frac{x}{2(1 - \cos(d_0 / 2))} = \text{const } U_k^{-1} U$. Здесь d_0 — угол

электропередачи, при котором введено ограничение параметра x_{k0} , т.е. мощности Q_{k0} .

Рассмотрим влияние места установки СТК на основные характеристики электропередачи $P, Q_k = f(d)$ при сохранении условий $\left| \frac{\&}{U_1} \right| = \left| \frac{\&}{U_2} \right| = \left| \frac{\&}{U_k} \right| = U_{\text{ном}} = U$.

Как уже было отмечено, если точка подключения параллельного устройства FACTS находится строго посередине ВЛ, то пропускная способность электропередачи будет наибольшей:

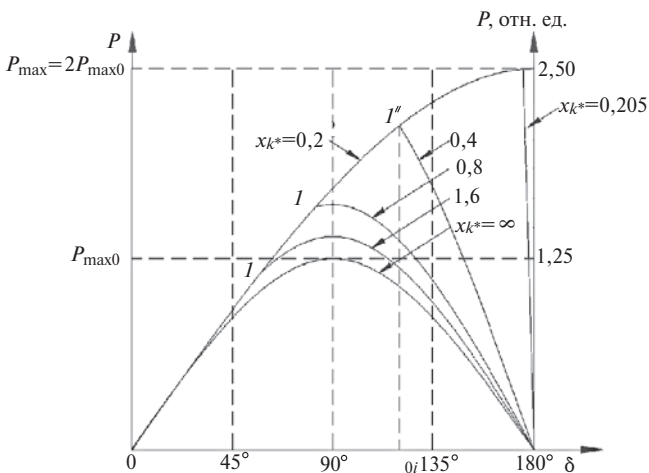


Рис. 3. Угловые характеристики электропередачи при вариации мощности СТК и $x_1 = x_2$ ($x_k = \infty$ — нет СТК)

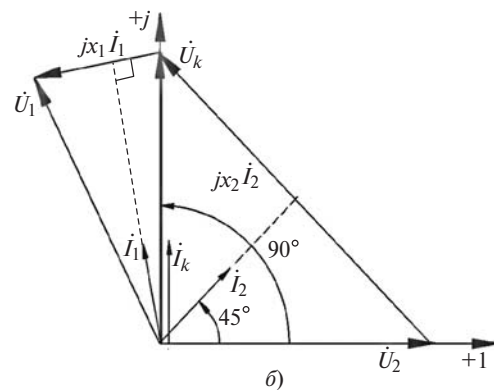
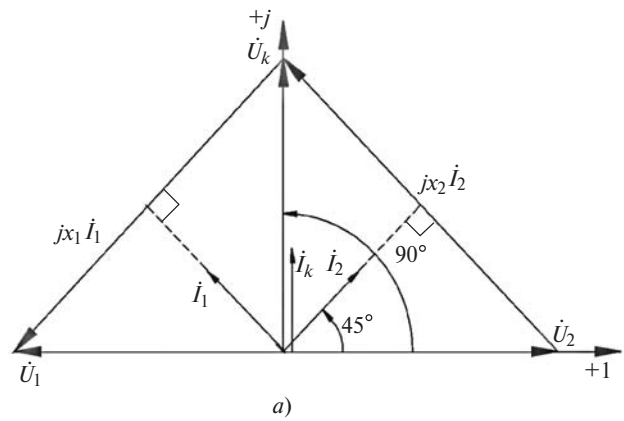


Рис. 4. Векторные диаграммы напряжений и токов при размещении СТК в середине ВЛ (а) и ближе к началу ВЛ (б)

$P = P_{\text{max}} = \frac{U^2}{x} = 2,5$ отн.ед., а мощность СТК при $d = 180^\circ$ для рассматриваемого примера должна быть равна $Q_k = \frac{2U^2}{x} = 5,0$ отн.ед. Векторная диаграмма напряжений и токов при $d = 180^\circ$ показана на рис. 4,а.

При смещении точки подключения СТК от середины ВЛ предельная мощность снижается и равна предельной мощности более протяженного участка, например при смещении точки включения СТК ближе к началу линии: x_1 — первый участок, а $x_2 = kx_1$ — второй ($x_{\text{л}} = x_1 + kx_1$). Максимальная мощность электропередачи при максимальном угле электропередачи второго участка $d_k = 90^\circ$

$$P_{\text{max}} = \frac{U^2}{kx_1} = \frac{U^2(1+k)}{x_{\text{л}}k}$$

Максимальный угол электропередачи можно определить, анализируя первый участок x_1 с углом, равным $d_k = 90^\circ$:

$$\frac{U^2}{kx_1} = \frac{U^2}{x_1} \sin(d_{\text{max}} - 90^\circ) = - \frac{U^2}{x_1} \cos d_{\text{max}}, \quad (15)$$

откуда $\cos d_{\text{max}} = - 1/k$, $d_{\text{max}} = \arccos(- 1/k)$.

Требуемая мощность СТК при выполнении условий $\left| \dot{U}_1 \right| = \left| \dot{U}_2 \right| = \left| \dot{U}_k \right| = U_{\text{НОМ}} = U$ с учетом (9) и (15)

$$Q_{k \max} = \frac{2U^2(k+1)}{kx_1(1+k+\sqrt{k^2-1})} \quad (16)$$

Угловая характеристика активной мощности на основании (5), (7) и (8) будет определяться следующими соотношениями:

$$x_k(d) = \frac{x_1(k+1+\sqrt{1+k^2+2k \cos d})}{2(1-\cos d)};$$

$$x_{12}(d) = x_1 + x_2 - \frac{x_1 x_2}{x_k(d)};$$

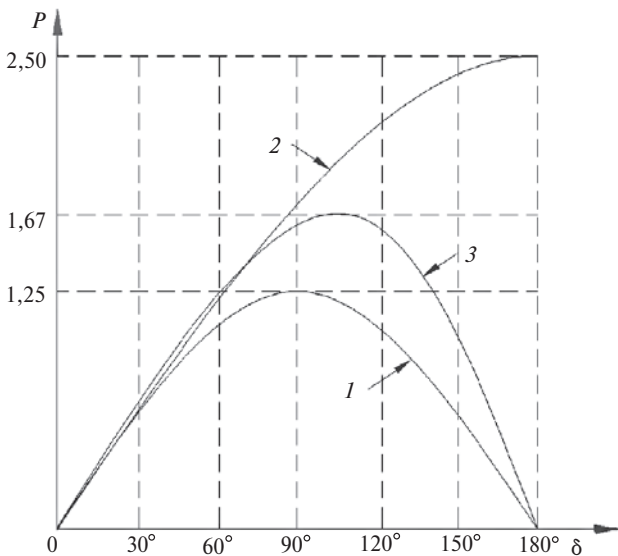


Рис. 5. Угловая характеристика электропередачи при смещении узла включения СТК от середины линии: 1 – характеристика линии без СТК ($P_{\max 0} = 1,25$ отн.ед.); 2 – с СТК в середине линии $x_1 = x_2 = 0,4$ отн.ед. ($P_{\max} = 2,5$ отн.ед.); 3 – при смещении точки подключения СТК ($k = 3$; $P_{\max} = 1,67$ отн.ед.)

$$P(d) = \frac{U^2}{x_{12}(d)} \sin d.$$

Векторная диаграмма напряжений и токов для этого случая показана на рис. 4,б (при $k = 3$ ($x_1 = 0,2$ отн.ед., $x_2 = kx_1 = 0,6$ отн.ед.), при этом $P_{\max} = 1,67$ отн.ед., $d_{\max} = 90 + 19 = 109^\circ$ и $Q_k = 1,955$ отн.ед.

На рис. 5 показаны угловые характеристики активной мощности электропередачи. Таким образом, чем ближе устройство FACTS параллельного включения установлено к середине линии, тем ближе максимум угловой характеристики электропередачи к значению $d = 180^\circ$ или $d_k = 90^\circ$.

На рис. 6 представлена зависимость максимальной передаваемой мощности и требуемой установленной мощности устройства СТК в зависимости от места его включения на ВЛ при $x_{1*} + x_{2*} = 0,8$. Из рис. 6 видно, что смещение точки установки

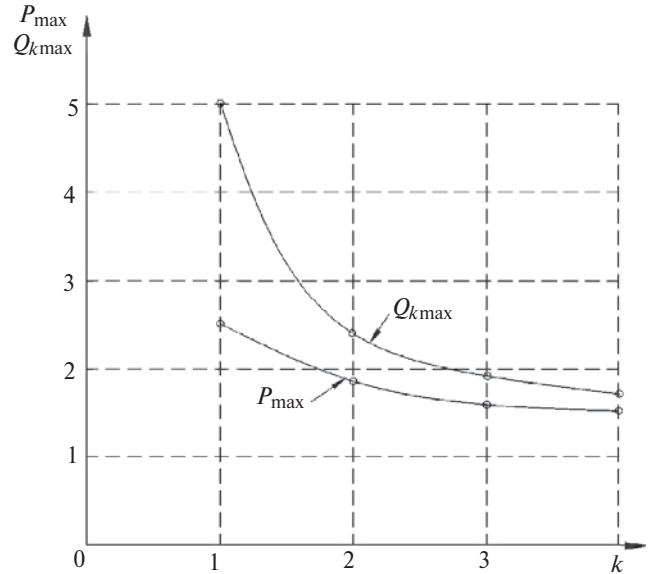


Рис. 6. Зависимость $P_{\max}, Q_{k \max}$ от места включения устройства

параллельного устройства FACTS от середины электропередачи приводит к уменьшению пропускной способности электропередачи и, соответственно, к уменьшению требуемой реактивной мощности данного устройства для поддержания номинального напряжения в узле подключения.

Источник ЭДС – СТАТКОМ, СК(АСК) параллельного включения. Рассмотрим случай, когда вместо управляемой емкости в качестве параллельного устройства рассматривается некий управляемый источник ЭДС \dot{E}_k за реактивным сопротивлением

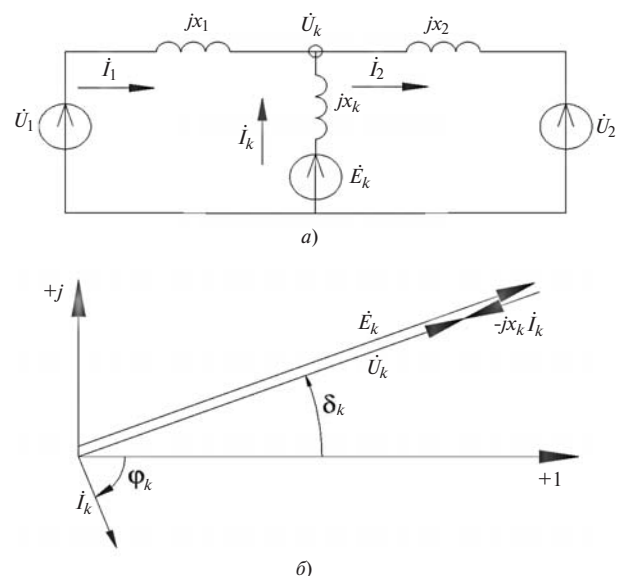


Рис. 7. Схема замещения (а) и векторная диаграмма (б) электропередачи с источником ЭДС

x_k , как это показано на схеме замещения рассматриваемой электропередачи (рис. 7,а) и соответствующей векторной диаграмме (рис. 7,б). В качестве такого устройства могут быть использованы СТАТКОМ, СК или АСК.

Уравнения установившегося режима имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} U_1 &= E_k - jx_k I_k + jx_1 I_1; U_2 = E_k - jx_k I_k - jx_2 I_2; \\ U_k &= E_k - jx_k I_k; I_k = I_2 - I_1; E_k = E_k e^{jd_k}; \\ U_k &= U_k e^{jd_k}, \text{ и, соответственно, } d_k = d_k \text{ (см.} \end{aligned}$$

рис. 7,б), $I_k = I_k e^{j(d_k - 90)}$.

В этом случае токи определяются по формулам:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{jx_2 E_k - j(x_2 + x_k)U_1 + jx_k U_2}{x_1 x_2 + x_1 x_k + x_2 x_k}; \\ I_2 &= \frac{-jx_1 E_k - jx_k U_1 + j(x_1 + x_k)U_2}{x_1 x_2 + x_1 x_k + x_2 x_k}; \\ I_k &= \frac{-j(x_1 + x_2)E_k + jx_2 U_1 + jx_1 U_2}{x_1 x_2 + x_1 x_k + x_2 x_k}. \end{aligned} \quad (17)$$

Напряжение U_k и $\text{tg} d_k$:

$$\begin{aligned} U_k &= \frac{x_1 x_k U_2 + x_2 x_k U_1 + x_1 x_2 E_k}{x_1 x_2 + x_1 x_k + x_2 x_k}; \\ \text{tg} d_k &= \frac{x_2 x_k U_1 \sin d + x_1 x_2 E_k \sin d_k}{x_1 x_k U_2 + x_2 x_k U_1 \cos d + x_1 x_2 E_k \cos d_k}. \end{aligned} \quad (18)$$

Учитывая то обстоятельство, что векторы U_k и E_k коллинеарны (см. рис. 7,б), из (18) получим:

$$\begin{aligned} &x_1 x_k U_2 \sin d_k + x_1 x_2 U_1 \cos d \sin d_k + \\ &+ x_1 x_2 E_k \cos d_k \sin d_k = x_2 x_k U_1 E_k \sin d \cos d_k + \\ &+ x_1 x_2 E_k \cos d_k \sin d_k, \end{aligned}$$

откуда

$$\sin d_k = \frac{x_2 U_1}{x_1 U_2} \sin(d - d_k). \quad (19)$$

Для случая $U_1 = U_2$ и $x_1 = x_2$ имеем:

$$\sin d_k = \sin(d - d_k); d_k = d/2. \quad (20)$$

Значение E_k определяется из квадратного уравнения:

$$\begin{aligned} &E_k^2 + 2E_k \frac{x_k}{x_1 x_2} (x_1 U_2 \cos d_k + x_2 U_1 \cos(d - d_k)) + \\ &+ \frac{1}{x_1^2 x_2^2} (x_k^2 (x_1^2 U_2^2 + x_2^2 U_1^2) + 2x_1 x_2 x_k^2 U_1 U_2 \cos d - \end{aligned}$$

$$- (x_1 x_2 + x_1 x_k + x_2 x_k)^2 U_k^2) = 0. \quad (21)$$

Для случая $|U_1| = |U_2| = |U_k| = U_{\text{ном}} = U$ и

$x_1 = x_2 = x$ после достаточно простых преобразований получим

$$E_k = U \left(1 + 4 \frac{x_k}{x} \sin^2 \frac{d_k}{2} \right) \frac{d_k}{2} \frac{d_k}{2} = U \left(1 + 2 \frac{x_k}{x} \cos \frac{d_k}{2} \right) \frac{d_k}{2}$$

Ток и реактивная мощность в точке $|U_k| = U_{\text{ном}}$:

$$I_k = 4 \frac{U}{x} \sin^2 \frac{d_k}{2} = 2 \frac{U}{x} \left(1 - \cos \frac{d_k}{2} \right) \quad (22)$$

$$Q_k = \text{Im}(U_k I_k) = 4 \frac{U^2}{x} \sin^2 \frac{d_k}{2} = 2 \frac{U^2}{x} \left(1 - \cos \frac{d_k}{2} \right) \quad (23)$$

Таким образом, при $x_1 = x_2$ требуемое значение реактивной мощности для поддержания номинального напряжения в узле подключения устройства в случае параллельно включенного источника ЭДС (23) совпадает с мощностью СТК (14).

Общее выражение, описывающее угловую характеристику электропередачи, имеет следующий вид:

$$P = \text{Re}(U_2 I_2) = \frac{x_k U^2 \sin d + x_1 U E_k \sin d}{x_1 x_2 + x_1 x_k + x_2 x_k}. \quad (24)$$

Из (17) получим

$$E_k \sin d_k = \frac{x_2 U_1 \sin d + (x_1 x_2 + x_1 x_k + x_2 x_k) I_k \sin d_k}{x_1 + x_2}.$$

Подставляя полученное значение в (24), после достаточно простых преобразований получим:

$$P = \frac{U^2}{x_1 + x_2} \sin d + \frac{U I_k x_1}{x_1 + x_2} \sin(d/2)$$

или для $x_1 = x_2 = x$

$$P = \frac{U^2}{2x} \sin d + \frac{U I_k}{2} \sin(d/2) = P_1 + P_2. \quad (25)$$

При $|U_k| = U_{\text{ном}} = U$ после подстановки в (25) I_k

из (22) получим

$$P = \frac{U^2}{x} \sin(d/2) = P_{\text{max}} \sin(d/2) = 2 P_{\text{max}0} \sin(d/2),$$

что совпадает с характеристикой для электропередачи с СТК (13).

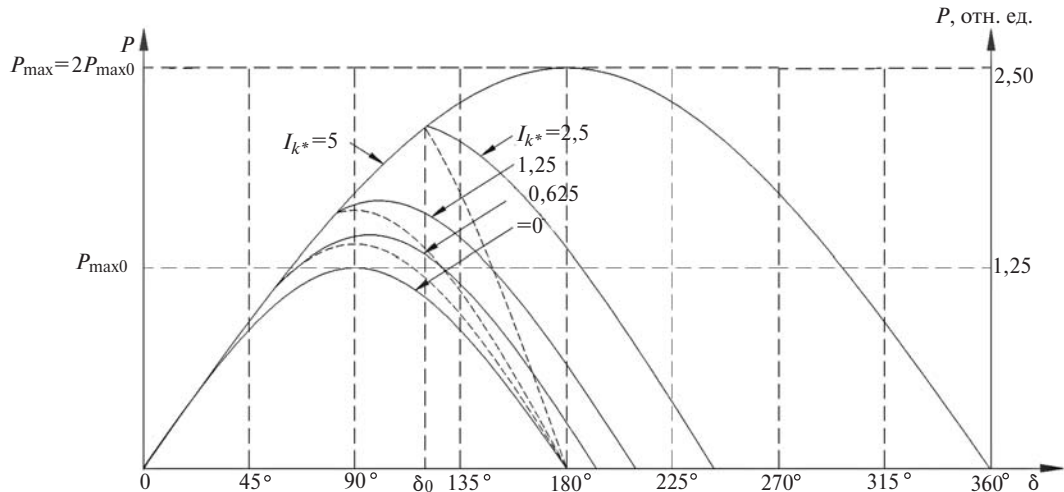


Рис. 8. Угловые характеристики электропередачи при вариации мощности источника ЭДС: - - - - характеристики, соответствующие СТК для таких же значений токов

Если мощность параллельного устройства FACTS (СК, СТАТКОМ, АСК) ограничена, то это учитывается как ограничение тока I_k ($I_{k0} = \text{const}$ или $Q_k = Q_{k0} = \text{const}$), и тогда угловая характеристика электропередачи с параллельным FACTS определяется (25) как сумма двух составляющих P_1 и P_2 при заданном значении I_{k0} (Q_{k0}).

На рис. 8 представлены угловые характеристики электропередачи (для рассматриваемого примера) с источником ЭДС при $Q_{k*} < 5$ ($I_{k*} < 5$).

Угол d_0 , соответствующий началу ограничений тока или мощности параллельного источника ЭДС ($I_k = I_{k0}$ или $Q_k = Q_{k0}$), определяется из формулы (22) при $I_k = I_{k0}$ и $d = d_0$:

$$I_{k0} = 2 \frac{U \infty}{x \infty} \cos \frac{d_0}{2}$$

откуда

$$d_0 = 2 \arccos \frac{I_{k0} x}{2U}$$

Далее угловая характеристика $P(d)$ рассчитывается по (25) при $I_k = I_{k0} = \text{const}$. Точками пересечения функции (25) с осью абсцисс, в которых $P = 0$, будут $d_{10} = 0$ и $d_{20} = 2 \arccos[\cos(d_0/2) - 1]$.

Сравнение параллельно включенных СТК и источника ЭДС (СТАТКОМ, СК, АСК). Анализ приведенных соотношений показывает следующее.

При поддержании постоянного (номинального) значения напряжения в произвольном узле включения параллельного устройства FACTS при всех возможных режимах работы рассмотренной электропередачи достигается одинаковое значение максимальной активной мощности (P_{max}) для всех типов устройств параллельного включения. Требуемая при этом реактивная мощность одинакова.

При ограниченной реактивной мощности указанных устройств и соответственно невозможности поддержания при всех режимах работы заданного уровня напряжения в узле подключения устройства характеристики $P(d)$ для случаев СТК и источника ЭДС различаются. При этом, если точки d_{0i} характеристики $P(d)$ находятся левее значения угла $d = 90^\circ$, то характеристика электропередачи с источником ЭДС в середине линии имеет больший максимум, смещенный вправо, чем характеристика электропередачи с СТК. Если точки d_{0i} располагаются правее углов 90° , то максимумы характери-

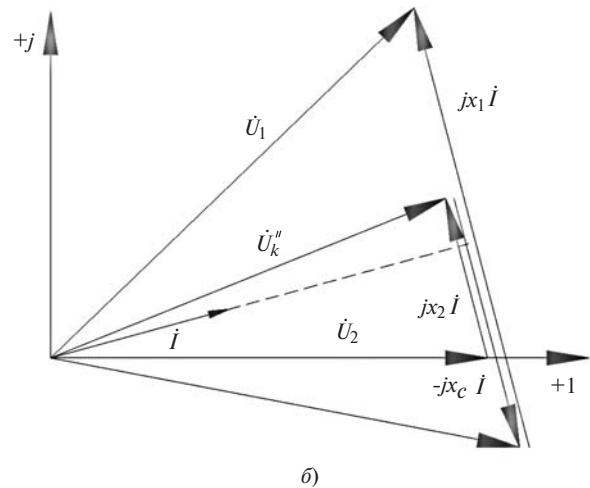
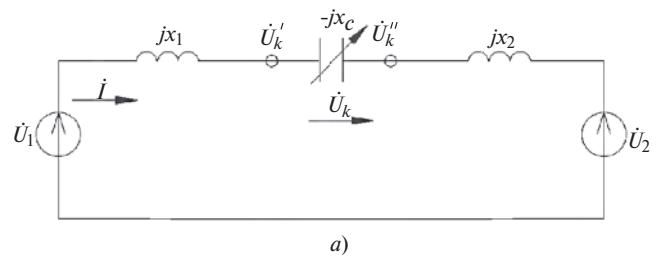


Рис. 9. Схема замещения (а) и векторная диаграмма (б) рассматриваемой электропередачи с УУПК

стик электропередачи с СТК и источниками ЭДС совпадают, т.е. в данном случае они равноценны.

Смещение характеристик $P(d)$ при наличии источника ЭДС в сторону углов, больших, 90° , позволяет предположить возможность увеличения динамической устойчивости электроэнергетической системы с устройствами в виде параллельного источника ЭДС.

Устройства последовательного включения. Для увеличения пропускной способности электропередачи применяется последовательная емкостная компенсация падения напряжения на индуктивном сопротивлении линии. В зависимости от степени компенсации, типа и места включения последовательного устройства FACTS в линию угловая характеристика электропередачи, уровни напряжений на зажимах устройств и мощности этих устройств варьируются.

Последовательно включенное регулируемое емкостное устройство (УУПК). На рис. 9 представлены схема замещения исследуемой электропередачи и ее векторная диаграмма напряжений и токов при включении компенсирующей емкости $x_c = 0,5(x_1 + x_2)$ в произвольной промежуточной точке электропередачи ($x_1 \neq x_2$).

Уравнения установившегося режима (в отн.ед.) при заданном значении x_c :

$$\begin{aligned} U_1 &= U_2 + jx_2 I - jx_c I + jx_1 I; \\ U_1 &= U_k + jx_1 I; \\ U_k &= U_2 - jx_c I; \\ U_k &= U_2 + jx_2 I; \end{aligned} \quad (26)$$

Из (26) получены выражения для тока в линии и падения напряжения на рассматриваемом устройстве:

$$\begin{aligned} I &= \frac{U_1 - U_2}{j(x_1 + x_2 - x_c)}; \\ I &= \frac{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 - 2U_1U_2 \cos d}}{x_1 + x_2 - x_c}; \\ \text{tg } \varphi_1 &= \frac{U_2 - U_1 \cos d}{U_1 \sin d}; \\ U_k &= -jx_c I = x_c \frac{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 - 2U_1U_2 \cos d}}{x_1 + x_2 - x_c} e^{j(\varphi_1 - 90)} \end{aligned} \quad (27)$$

Аналогичным образом выводятся выражения для значений напряжений на зажимах УУПК:

$$U_k = \frac{\sqrt{U_1^2(x_2 - x_c)^2 + U_2^2 x_1^2 + 2U_1U_2 x_1(x_1 + x_2) \cos d} - x_c}{x_1 + x_2} \quad (28)$$

$$\text{tg } \varphi_k = \frac{U_1(x_2 - x_c) \sin d}{U_1(x_2 - x_c) \cos d + U_2 x_1}$$

$$U_k = \frac{\sqrt{U_2^2(x_1 - x_c)^2 + U_1^2 x_2^2 + 2U_1U_2 x_2(x_1 - x_2) \cos d} - x_c}{x_1 + x_2} \quad (29)$$

$$\text{tg } \varphi_k = \frac{U_1 x_2 \sin d}{U_2(x_1 - x_c) + U_1 x_2 \cos d}$$

Нетрудно получить выражения для характеристики активной мощности и необходимой мощности УУПК:

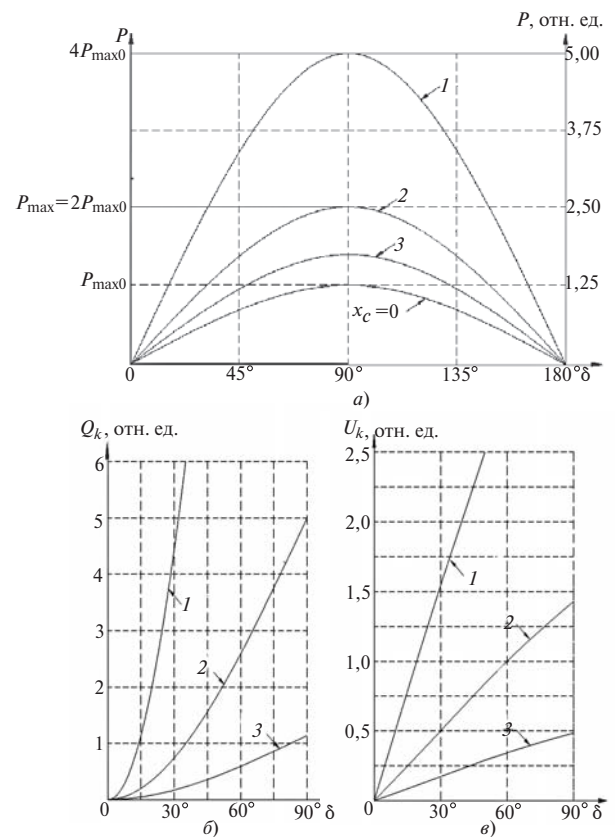


Рис. 10. Угловые характеристики электропередачи при различной степени ёмкостной компенсации (а), зависимости мощности УУПК (б) и напряжения на зажимах УУПК (в) от угла электропередачи при размещении устройства в середине линии ($x_1 = x_2$): 1 – степень компенсации 75% ($x_c = 0,6$); 2 – 50% ($x_c = 0,4$); 3 – 25% ($x_c = 0,2$)

$$P = \operatorname{Re}(U_1 I) = \frac{U_1 U_2}{x_1 + x_2 - x_c} \sin d;$$

$$Q_k = \operatorname{Im}(U_k I) = x_c \frac{U_1^2 + U_2^2 - 2U_1 U_2 \cos d}{(x_1 + x_2 - x_c)^2}.$$
(30)

Рассмотрим частный случай $|U_{1*}| = |U_{2*}| = U_{\text{ном}} = U$

при 50% емкостной компенсации в середине линии $x_{1*} = x_{2*} = x_{c*} = x$. Тогда приведенные выражения (26)–(29) запишутся в следующем виде:

$$I = \frac{\sqrt{2}U\sqrt{1 - \cos d}}{x} e^{j(d/2)};$$

$$U_k = \sqrt{2}U\sqrt{1 - \cos d} e^{j((d/2) - 90)};$$

$$U_{\phi} = U e^{j0};$$

$$U_{\phi} = U e^{jd};$$
(31)

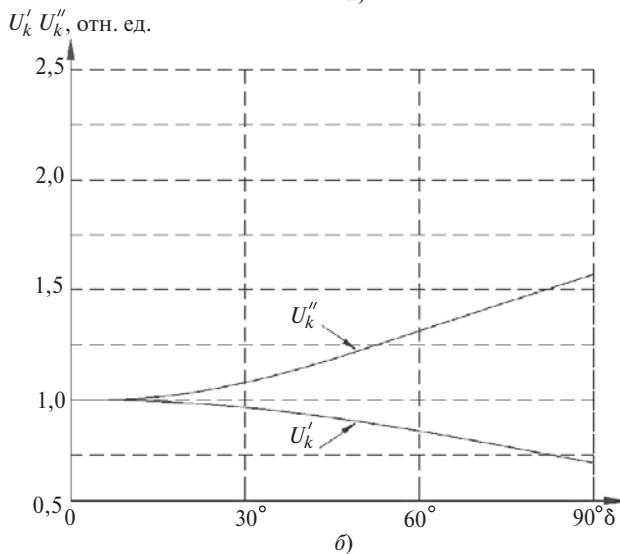
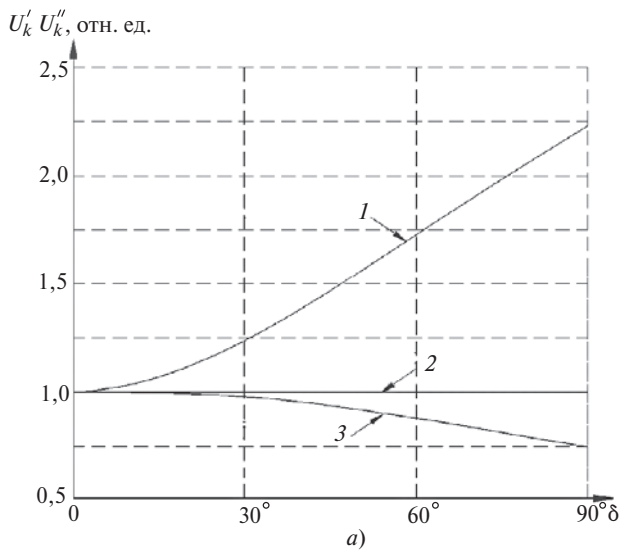


Рис. 11. Значения напряжения на зажимах УУПК в зависимости от передаваемой мощности: а – $x_c = \text{var}$ и $x_1 = x_2$ ($U_{\phi} = U_{\phi}$); 1, 2, 3 – см. рис. 10); б – 50% компенсации и $x_2 = 3x_1$

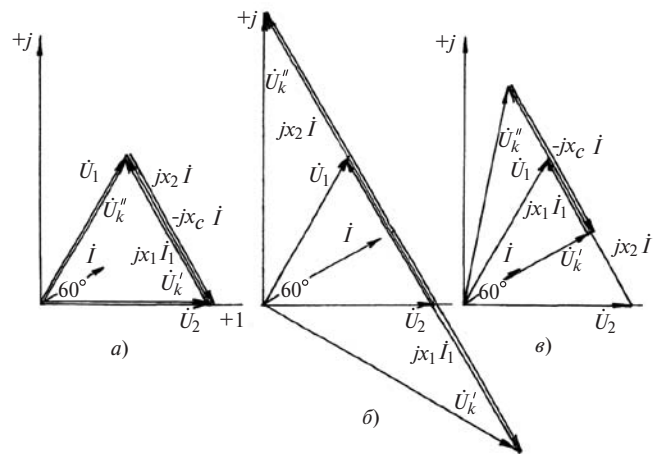


Рис. 12. Векторные диаграммы при угле электропередачи $d = 60^\circ$: а – $x_c = 0,4$ (50%) в середине линии; б – $x_c = 0,6$ (75%) в середине линии; в – $x_c = 0,4$ (50%) со смещением УУПК к началу линии ($x_1 = 0,2$; $x_2 = 3x_1 = 0,6$)

$$P = \frac{U^2}{x} \sin d = P_{\max} \sin d = 2 P_{\max 0} \sin d;$$

$$Q_k = \frac{2U^2}{x} (1 - \cos d) = 2 P_{\max} (1 - \cos d) =$$

$$= 4 P_{\max 0} (1 - \cos d) = 2 \frac{P_{\max}}{P_{\max 0}} (P_{\max} - P_{\max 0}).$$
(32)

Рассмотрим конкретные примеры. На рис. 10 построены зависимости $P, Q_k, U_k = f(d)$ для электропередачи при $|U_{1*}| = |U_{2*}| = U = 1$ и $x_{1*} = x_{2*} = 0,4$ для трех степеней компенсации и размещении УУПК в середине линии.

На рис. 11 показаны зависимости напряжений $U_{\phi}, U_{\phi} = f(d)$ на зажимах УУПК в середине линии ($x_1 = x_2$), при различной компенсирующей емкости и при размещении УУПК (50%) ближе к началу линии ($x_1 = 0,2$; $x_2 = 3x_1 = 0,6$) от угла d .

На рис. 12 приведены векторные диаграммы напряжений и токов при $d = 60^\circ$ для различной степени емкостной компенсации в середине линии и при смещении места подключения УУПК (50%) к началу линии.

При 50% компенсации, как следует из (31), рис. 11, а и векторной диаграммы рис. 12, а напряжения $U_{\phi} = U_2$ и $U_{\phi} = U_1$ совпадают по модулю и фазе независимо от передаваемой по линии мощности, что является несомненным преимуществом УУПК при размещении его в середине линии. Необходимо также отметить, что установка УУПК в середине линии (независимо от степени компенсации) соответствует свойству фазоповоротного устройства, искусственно получаемого в данном случае.

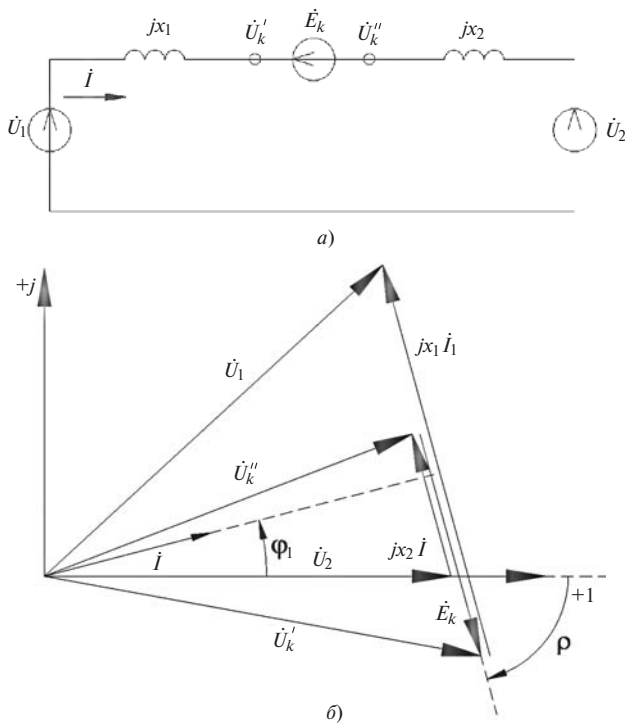


Рис. 13. Схема замещения (а) и векторная диаграмма (б) электропередачи с последовательно включенным источником ЭДС

Как видно из зависимостей изменения напряжений на зажимах УУПК (рис. 11,а) и векторной диаграммы (рис. 12,б), не рекомендуется применять емкостную компенсацию выше 50% из-за недопустимого превышения напряжения на зажимах устройства ($U_{\text{ж}}, U_{\text{ж}} = f(\delta)$) (больше 1,05 при $x_c = 75\%$).

На рис. 11,б показана зависимость $U_{\text{ж}}, U_{\text{ж}} = f(\delta)$ при установке УУПК не в середине электропередачи, а на расстоянии 25% от начала для случая 50% компенсации. В этом случае происходит перекося напряжения на зажимах УУПК, что необходимо учитывать при проектировании.

Последовательно включенный источник ЭДС – СТАТКОМ, СК(АСК). Рассмотрим электропередачу, где последовательно в линию включается некоторый управляемый источник ЭДС (последовательное включение устройств СТАТКОМ, СК или АСК), вектор которого \dot{E}_k ортогонален вектору

тока в линии \dot{I} (рис. 13). При этом ток, создаваемый этой ЭДС, по фазе совпадает с током в линии: $\dot{E}_k = E_k e^{j\tau}$ ($\tau = j_1 - \rho/2$ — соответствует емкостному режиму работы источника ЭДС; $\tau = j_1 + \rho/2$ — индуктивному).

Рассматриваемая электропередача характеризуется следующими параметрами при работе источника ЭДС в емкостном режиме:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_2 - \dot{E}_k}{j(x_1 + x_2)} = \frac{U_1 \sin \delta + E_k \cos j_1}{x_1 + x_2}$$

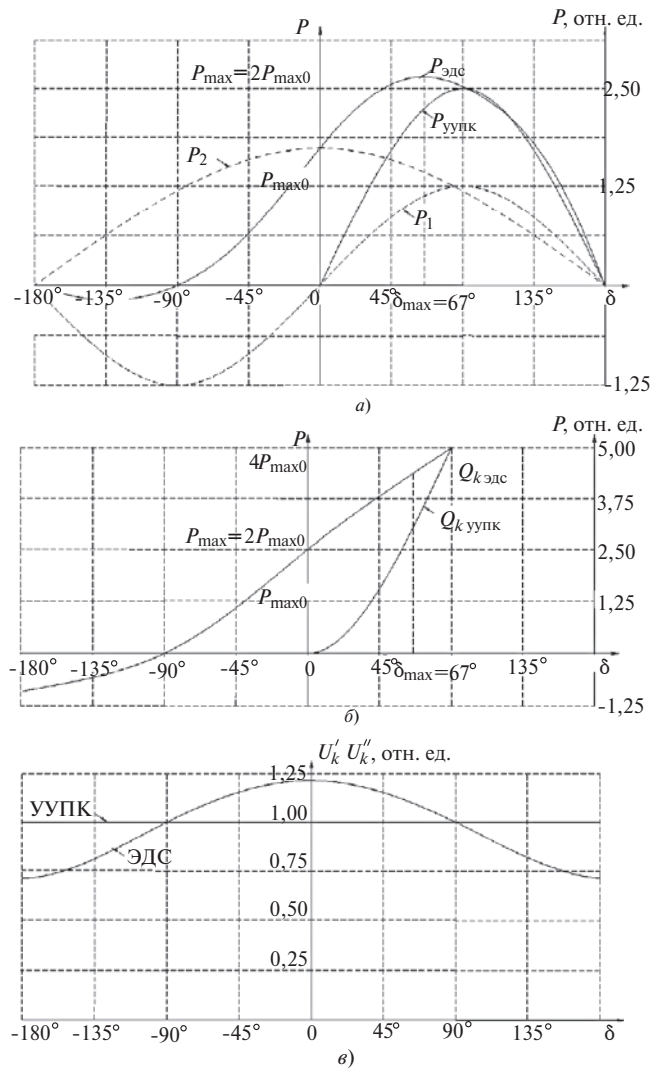


Рис. 14. Режимные зависимости для последовательно включенного источника ЭДС: а – угловая характеристика электропередачи; б – изменение требуемой мощности устройства; в – изменение напряжения на зажимах устройства

$$+ j \frac{U_2 - U_1 \cos \delta + E_k \sin j_1}{x_1 + x_2}; \quad (33)$$

$$P = \text{Re}(\dot{U}_1 \dot{I}) = \frac{U_1 U_2}{x_1 + x_2} \sin \delta + \frac{U_2 E_k}{x_1 + x_2} \cos j_1;$$

$$Q_k = \text{Im}(\dot{U}_k \dot{I}) = E_k \frac{E_k + \sqrt{U_1^2 + U_2^2 - 2U_1 U_2 \cos \delta}}{x_1 + x_2}.$$

При $\left| \frac{\dot{U}_1}{U_1} \right| = \left| \frac{\dot{U}_2}{U_2} \right| = U_{\text{ном}} = U$ и $x_1 = x_2 = x$ из (33)

$j_1 = \delta/2$ и следовательно:

$$P = \frac{U^2}{2x} \sin \delta + \frac{E_k U}{2x} \cos(\delta/2) = P_1 + P_2; \quad (34)$$

$$Q_k = E_k \frac{E_k + 2U \sin(\delta/2)}{2x}.$$

На рис. 14 представлены угловая характеристика электропередач с последовательно включенным источником ЭДС $E_{k^*} = U_{k \max}^{уупк^*} = \sqrt{2}U = 1,41$ (и УУПК), зависимости изменения его мощности и изменения напряжения на зажимах устройства от угла электропередачи.

Напряжения $U_{\mathcal{K}}$ и $U_{\mathcal{K}}$ в данном случае определяются выражениями:

$$U_{\mathcal{K}} = \frac{U_1 x_2 + U_2 x_1 + E_k x_1}{j(x_1 + x_2)}; \quad U_{\mathcal{K}} = \frac{U_1 x_2 + U_2 x_1 - E_k x_1}{j(x_1 + x_2)}.$$

При $x_1 = x_2 = x; U_1 = U_2 = U$ имеем:

$$U_{\mathcal{K}} = \frac{U(1 + e^{jd}) + E_k}{2j}; \quad U_{\mathcal{K}} = \frac{U(1 + e^{jd}) - E_k}{2j}.$$

Сравнение УУПК и последовательно включенного СТАТКОМ (СК, АСК). Из рис. 14 следует, что при наличии последовательно включенного источника ЭДС (СТАТКОМ, СК, АСК) в сравнении с УУПК максимум угловой характеристики электропередачи $P(d)$ смещается в сторону меньших углов, достигая максимума при $d_{\max} = 67^\circ$ для принятых параметров электропередачи, который при $E_k = U\sqrt{2} = 1,41$ превышает P_{\max} в случае УУПК на 5%. При этом напряжения на зажимах последовательно включенного источника ЭДС равны:

$$U_{\mathcal{K}} = \frac{U_1 + U_2 - E_k}{2} = 1,1e^{j(74)};$$

$$U_{\mathcal{K}} = \frac{U_1 + U_2 + E_k}{2} = 1,1e^{-j(7)}.$$

и превышают номинальные значения. Для снижения этих напряжений необходимо уменьшить ЭДС E_k .

Поддержание номинального напряжения на шинах источника ЭДС $U_{\mathcal{K}} = U_{\mathcal{K}} = U_{\text{ном}}$ достигается, как и в случае УУПК ($x_c = 50\% x_L = -x$), при уменьшении E_k и компенсации половины падения напряжения на индуктивном сопротивлении линии, т.е.

$$E_k = \left| U_1 - U_2 \right| = 2U \sin(d/2). \quad (35)$$

После подстановки (35) в формулы (34) и несложных преобразований получаем:

$$P = \frac{2U^2}{x} (\sin d + 2 \sin(d/2) \cos(d/2)) = \frac{U^2}{x} \sin d;$$

$$P_{\max} = \frac{U^2}{x};$$

$$Q_k = \frac{2U^2 \sin^2(d/2)}{x} = \frac{2U^2}{x} (1 - \cos d) = 2P_{\max} (1 - \cos d);$$

$$Q_{k \max} = \frac{2U^2}{x}.$$

Эти выражения при выполнении условий

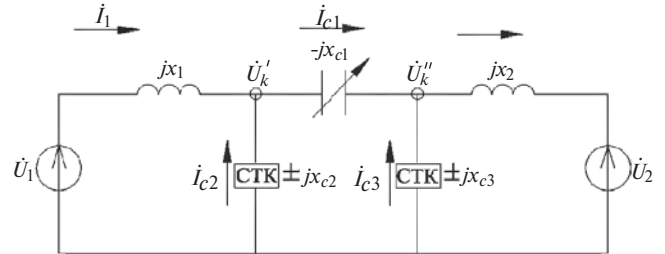


Рис. 15. Схема электропередачи при смещении УУПК от середины линии и стабилизации напряжения на его зажимах

$|U_1| = |U_2| = |U_{\mathcal{K}}| = |U_{\mathcal{K}}| = U_{\text{ном}} = U$ и $x_1 = x_2 = x$ совпадают с выражениями, полученными для электропередачи с УУПК 50% (32). Следовательно, для обеспечения в установившемся режиме одинаковых уровней напряжения в контролируемой точке электропередачи и при одном и том же значении P_{\max} требуемое значение реактивной мощности устройства FACTS не зависит от типа устройства.

Сравнение последовательно и параллельно включенных устройств FACTS. Как следует из изложенного, параллельные и последовательные устройства при их включении в середину линии электропередачи имеют равные установленные мощности устройств FACTS (при заданных параметрах линии $Q_{k^*} = 5$) при одинаковых максимальных значениях активной мощности P_{\max} электропередачи ($P_{\max^*} = 2P_{\max 0} = 2,5$) и одних и тех же значениях напряжения в узлах подключения устройств (U_k при параллельном включении и $U_{\mathcal{K}} = U_{\mathcal{K}}$ при продольном).

Если же устройства параллельного и последовательного включения установлены не в середине электропередачи, то при равной пропускной способности, как видно на примере сопоставления УУПК и СТК, требуемая мощность СТК больше, чем мощность УУПК. Однако в данном случае напряжения на зажимах УУПК неодинаковы и отличаются от заданного (номинального) значения. В случае стабилизации напряжения на зажимах УУПК посредством дополнительных параллельных устройств FACTS, как это показано на рис. 15, мощности устройств СТК и алгебраическая сумма мощностей УУПК с учетом дополнительных параллельных устройств FACTS оказываются равными.

Пусть $x_1 = 0,2$, $x_2 = kx_1$ ($k=3$). Как уже было указано, при параллельном включении устройства FACTS и поддержании номинального напряжения в узле подключения предел передаваемой мощности определяется наибольшим участком электропередачи:

$$P_{\max}^{\text{пар}} = \frac{U^2}{3x_1} = 1,66.$$

При этом мощность СТК согласно (16)

$$Q_{k^*}^{\text{пар}} = \frac{2U^2(k+1)}{kx_1(1+k+\sqrt{k^2-1})} = 1,95.$$

Определим требуемую мощность УУПК при условии равного влияния на пропускную способность электропередачи, которая с учетом (19)–(23) равна ($x_c = x_1 = 0,2$):

$$Q_{k^*}^{\text{пос}} = 1,11.$$

При учете дополнительных параллельных устройств FACTS для рассматриваемого случая $x_c = x_1$ будем иметь:

$$Q_{c1^*} = 0,57; \quad Q_{c2^*} = 0; \quad Q_{c3^*} = 1,36;$$

$$Q_S = Q_k^{\text{пос}} = Q_{c1^*} + Q_{c2^*} + Q_{c3^*} = 1,95 = Q_k^{\text{пар}}.$$

Таким образом, для равенства последовательной и параллельной частей FACTS при их смещении от середины линии необходимым условием является поддержание номинального напряжения на зажимах устройства последовательной части за счет дополнительных параллельных устройств FACTS. При этом в случае последовательной компенсации мощность устройств равна алгебраической сумме

мощностей как основного последовательного, так и дополнительных параллельных FACTS с учетом знаков емкостной и индуктивной составляющих.

Следовательно, при обеспечении в установившемся режиме равных уровней напряжений в узлах подключения устройств и равных значений перегрузочной способности электропередачи (P_{\max}) требуемые значения реактивных мощностей устройств FACTS одинаковы и не зависят от типа устройств.

Заключение. Независимо от способа включения в сеть (последовательно или параллельно) устройства FACTS заданной мощности электропередача будет обладать идентичными режимными свойствами, обеспечивая одинаковые значения пропускной способности и уровней напряжения.

При ограниченной мощности параллельных устройств FACTS и соответственно невозможности поддержания во всех режимах требуемых значений напряжения в узлах их подключения устройства на базе источников ЭДС обладают некоторыми режимными преимуществами перед индуктивно-емкостными устройствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кочкин В.И., Нечаев О.П. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. — М.: Изд-во «НЦ ЭНАС», 2000.
2. Hingorani N.G., Gyugyi L. Understanding FACTS. Concept and technology of Flexible AC Transmission Systems. — New York: IEEE press, 2000.
3. Лихачев А.П. Разработка моделей энергосистем с учетом гибких электропередач. — Электричество, 2013, № 2.

* * *

ЧИТАТЕЛЯМ, ПОДПИСЧИКАМ, РЕКЛАМОДАТЕЛЯМ ЖУРНАЛА «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

Подписка в России и странах СНГ принимается в отделениях связи.

Для желающих представить в журнал статью сообщаем, что правила подготовки рукописей публикуются в №№ 6 и 12 каждого года и на сайте журнала.

Реклама в черно-белом изображении может быть размещена на страницах журнала и на его обложке, а также в виде вкладки.

Возможно размещение рекламы в цветном изображении.

Стоимость оплаты рекламных статей — по договоренности.

При повторении той же рекламы в следующем номере — скидка 10%. При публикации той же рекламы в третьем и последующих номерах — скидка 20%. Последний срок представления рекламного материала — за 1,5 месяца до выхода номера из печати (обычно номер выходит в середине каждого месяца).

Адрес для переписки: 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 648

тел./факс: (495)362-7485

E-mail: l.s.kudinova@rambler.ru

4. **Кочкин В.И., Шакарян Ю.Г.** Применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока в энергосистемах. — М.: Изд-во «ТОРУС ПРЕСС», 2011.

5. **Гвоздев Д.Б., Дроздов А.В., Кочкин В.И.** Применение быстродействующих источников реактивной мощности в электрических сетях Западной Сибири. — Электрические станции, 2010, № 10.

6. **Фокин В.К., Филатова Л.К.** Электропередачи переменного тока и их применение в ЕНЭС России. — Энергия единой сети, 2013, № 3.

7. **Схема** и программа развития энергетической системы России на период 2012—2018 гг. — Приказ Минэнерго Российской Федерации от 13.08.2012 № 387.

[24.07.13]

Авторы: Шакарян Юрий Гевондович окончил факультет электрических машин Ереванского политехнического института в 1956 г. В 1974 г. защитил докторскую диссертацию «Режимы работы асинхронизированных генераторов в энергосистемах» в Энергетическом институте им. Г.М. Кржижановского. Научный руководитель ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС».

Фокин Владимир Константинович окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1970 г. В 1980 г. защитил кандидатскую диссертацию «Повышение устойчивости электропередач и узлов нагрузки путем регулирования возбуждения синхронных машин по двум осям». Главный научный сотрудник Центра надежности и режимов работы электрических сетей ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС».

Лихачев Андрей Петрович окончил электроэнергетический институт МЭИ (ТУ) по специальности «Электрические системы и сети» в 2009 г. Ведущий инженер, аспирант Лаборатории моделирования, исследования и применения регулирующих устройств в электрических сетях ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС».