

УДК 621.315

## О ЦЕЛЕСООБРАЗНОЙ СТЕПЕНИ УМЕНЬШЕНИЯ ИНДУКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Инж. ПОСПЕЛОВ Е. Г., засл. деят. науки и техники  
Республики Беларусь, докт. техн. наук, проф. ПОСПЕЛОВ Г. Е.

*Белорусский национальный технический университет*

Развитие электроэнергетических систем определяет необходимость увеличения пропускной способности электропередач, что может быть обеспечено за счет повышения номинального напряжения электропередачи и компенсации ее параметров. Последняя осуществима сосредоточенными компенсирующими устройствами или равномерно распределенными параметрами линии. Уточним возможности компенсации индуктивности ЛЭП.

Исследование [1] зависимости передаваемой мощности от степени компенсации индуктивного сопротивления линии передачи позволило установить понятие предельной степени продольной компенсации по пределу передаваемой мощности. Предел передаваемой мощности определялся по условиям статической устойчивости системы передачи, включающей удаленную электростанцию, повышающую подстанцию, линию, понижающую подстанцию и шины приемной системы. В качестве критерия статической устойчивости принимался знак свободного члена характеристического уравнения; предполагалось, что за счет правильной настройки автоматических регуляторов возбуждения генераторов устраняется возможность самораскачивания.

Предельной степенью продольной компенсации по пределу передаваемой мощности  $k_{\text{сп}}$  названо [1] значение степени продольной компенсации, при которой предел передаваемой мощности достигает максимума; после этого значения степени компенсации  $k_{\text{сп}}$  предел передаваемой мощности начинает быстро уменьшаться (рис. 1). Однако наши исследования показали, что при увеличении степени компенсации после  $k_{\text{сп}}$  предел передаваемой мощности быстро достигает нуля, а затем быстро возрастает до нового максимума и после плавно снижается (рис. 1).

При достаточно малой или компенсированной емкостной проводимости линии мощность, отдаваемая системой передачи приемнику составит

$$P = \frac{EU}{z} \sin(\Theta - \alpha) - \frac{U}{z} \sin \alpha,$$

где  $z$  – индуктивно-активное сопротивление системы электропередачи;  $\alpha = 90^\circ - \varphi$ ;  $\varphi$  – фазный угол сопротивления.

При наличии некомпенсированной емкостной проводимости или индуктивной (шунтирующего реактора) путем преобразований переходим к схеме без промежуточных проводимостей.

Предельное значение передаваемой мощности

$$P_m = \frac{EU}{z} - \frac{U}{z} \sin \alpha = \frac{EU}{\sqrt{r^2 + x^2}} - \frac{U^2 r}{r^2 + x^2}. \quad (1)$$

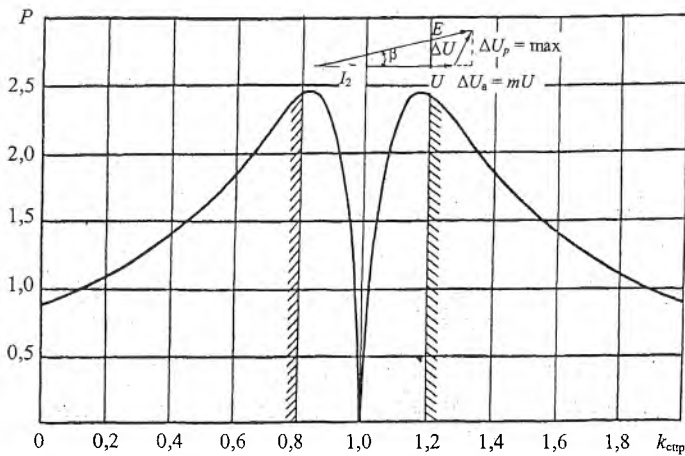


Рис. 1. Зависимость предела передаваемой мощности от степени продольной компенсации при  $x_r = 0$ ;  $\Delta U_a = 0$ ;  $k_L = 1$

В выражении (1) предела мощности  $P_m$  при компенсации индуктивного сопротивления электропередачи увеличивается и первое и второе слагаемые. Не получится ли при некоторой степени продольной компенсации уменьшения предела передаваемой мощности или существует ли некоторая предельная степень продольной компенсации по пределу мощности? Для рассмотрения этого вопроса введем вспомогательную переменную

$$\chi = \frac{x}{r}.$$

Тогда

$$\frac{z^2}{r^2} = 1 + \chi^2. \quad (2)$$

При коэффициенте мощности в конце линии, равном и близком к единице, векторная диаграмма системы передачи, у которой емкость линии скомпенсирована или которая путем преобразований приведена к схеме без промежуточных проводимостей. На основании векторной диаграммы (рис. 1) получим

$$E^2 = (m-1)^2 U^2 + m^2 U^2 \chi^2, \quad (3)$$

где  $m = \frac{\Delta U_a}{U}$  — коэффициент, характеризующий перепад напряжений в электропередаче.

Из векторной диаграммы и выражений (2), (3) получим

$$E = U \sqrt{1 + 2m + \frac{m^2}{r^2} z^2}. \quad (4)$$

Подставляя  $E$  из выражения (4) в формулу мощности

$$P_m = EUy = U^2 zy^2,$$

найдем

$$P_m = U^2 \sqrt{y^2(1+2m) + \left(\frac{m}{r}\right)^2} - U^2 r y^2, \quad (5)$$

где проводимость  $y = \frac{1}{z}$  – функция степени компенсации;  $\Delta U_a$  – падение напряжения в активном сопротивлении системы электропередачи.

На рис. 1 по формуле (5) построена зависимость предела передаваемой мощности от степени продольной компенсации для следующих данных:  $x_r = 0$ , что соответствует сильному регулированию возбуждения генераторов; индуктивное сопротивление линии электропередачи  $x_d = 1$ ;  $r = 0,1$ ;  $\Delta U_a = 0$  – принята работа линии электропередачи без перепада напряжений; значения параметров электропередачи указаны в относительных единицах при  $U_{\text{баз}} = 220$  кВ и  $P_{\text{баз}} = 280$  МВт.

В отличие от зависимости предела передаваемой мощности от степени продольной компенсации, полученной [1], на рис. 1 изображены возможности использования для повышения пропускной способности электропередачи перекомпенсации ее индуктивного сопротивления. Этот вывод представляет интерес особенно для разомкнутых и полуразомкнутых электропередач. Дело в том, что перекомпенсация может быть более экономичной, чем обычная компенсация, например в виде отрезков разомкнутых линий [2]; при этом затраты обратно пропорциональны требуемой величине емкостного сопротивления. Электропередачи, перекомпенсированные или с глубокой компенсацией, уже исследовались [3]. Поэтому в данной работе они не рассматриваются. В [3] было показано, что при условии применения специального автоматического регулятора возбуждения, подавляющего синхронное и асинхронное самовозбуждения, перекомпенсированные электропередачи могут работать с приемлемыми техническими параметрами.

Для определения предельной степени продольной компенсации  $k_{\text{спр}}$  про дифференцируем  $P_m$  по  $y$ , приравняем производную нулю, найдем уравнение, определяющее  $k_{\text{спр}}$ :

$$\frac{(1+2m)yU^2}{\sqrt{y^2(1+2m) + \left(\frac{m}{r}\right)^2}} - 2U^2 r y = 0$$

или

$$4(1+2m)r^2 y^2 = 1 + 4m,$$

откуда

$$\frac{4(1+2m)}{1+4m} = \frac{1}{r^2 y^2} = \frac{z^2}{r^2} = 1 + \chi^2.$$

Значение  $\chi$ , соответствующее  $k_{\text{спр}}$ :

$$\chi = \pm \sqrt{\frac{3+4m}{1+4m}}. \quad (6)$$

Если  $x_n$  и  $r$  – суммарное индуктивное и активное сопротивления системы электропередачи, а  $x_n$  – индуктивное сопротивление линии, то найдем:

$$x = x_n - x_n k_{\text{спр}};$$

$$x_n k_{\text{спр}} = x_n - x = x_n - r\gamma.$$

Отсюда и на основе выражения (6) получим

$$k_{\text{спр}} = \frac{x_n}{x_n} \pm \frac{r}{x_n} \sqrt{\frac{3+4m}{1+4m}}. \quad (7)$$

Формула (7) отражает предельную степень компенсации при коэффициенте эффективности продольной компенсации  $k_3 = 1$  [1]. При значении  $k_3 \neq 1$  вместо (7) следует написать

$$k_{\text{спр}} = \frac{1}{k_3} \left( \frac{x_n}{x_n} \pm \frac{r}{x_n} \sqrt{\frac{3+4m}{1+4m}} \right). \quad (8)$$

Коэффициент эффективности продольной компенсации  $k_3$  зависит от схемы и параметров компенсирующих устройств; при полной компенсации емкостной проводимости линии передачи  $k_3 = 1$  [1].

Большое количество расчетов компенсированных электропередач дало возможность авторам произвести уточнение зависимости предельной передаваемой мощности от эквивалентных сопротивлений генераторов и трансформаторов передающей электростанции и проводимостей линий электропередачи. На рис. 2 в виде поверхностей в трехмерном пространстве показаны зависимости предела передаваемой мощности от степени продольной компенсации и эквивалентного сопротивления генераторов и трансформаторов. Видно, что указанные зависимости состоят из совокупности двух седлообразных поверхностей; которые, пересекаясь, образуют линию – геометрическое место точек минимумов передачи передаваемой мощности. Кроме того, поверхности имеют две линии – геометрические места точек максимальных значений передаваемой мощности.

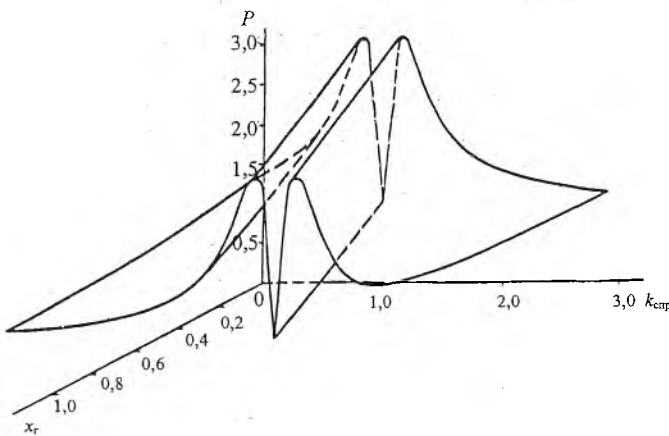


Рис. 2. Зависимость предела передаваемой мощности  $P$  от степени компенсации  $k_{\text{спр}}$  и эквивалентного сопротивления генераторов  $x_r$  при  $k_L = 1$

Влияние емкостной проводимости линии электропередачи на рассматриваемую зависимость характеризуется кривыми, изображенными на рис. 3 и 4. Рассчитано и построено большое число аналогичных зависимостей предела передаваемой мощности от степени продольной компенсации с учетом проводимостей линий электропередачи. Анализ этих расчетов и соответствующих кривых показал, что проводимости электропередачи нарушают симметрию ветвей зависимости предела передаваемой мощности от степени продольной компенсации, в частности максимумы предела передаваемой мощности для двух ветвей одной и той же зависимости могут иметь различные значения (рис. 3), что важно при выборе параметров конкретной компенсированной или разомкнутой и полуразомкнутой электропередачи. На рис. 2, 4 заметно существенное влияние на зависимости предела передаваемой мощности степени компенсации эквивалентного сопротивления генераторов и трансформаторов. Увеличение эквивалентного сопротивления генераторов и трансформаторов повышает значение степени продольной компенсации и расширяет области компенсации и перекомпенсации электропередачи; на рис. 1, 3 и 4 эти области выделены штриховкой. Из рис. 4 следует, что возможности продольной компенсации заметно повышают устройства поперечной компенсации емкостной линии электропередачи; значения степени поперечной компенсации  $k_L$  указаны в подристочных подписях (рис. 3, 4).

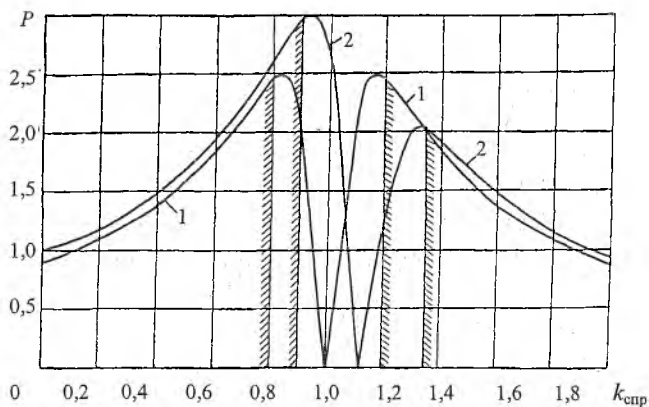


Рис. 3. Зависимости предела передаваемой мощности от степени продольной компенсации при: 1 -  $x_r = 0$ ;  $\Delta U_a = 0$ ;  $k_L = 0$ ; 2 -  $x_r = 0,1$ ;  $\Delta U_a = 0$ ;  $k_L = 0,1$

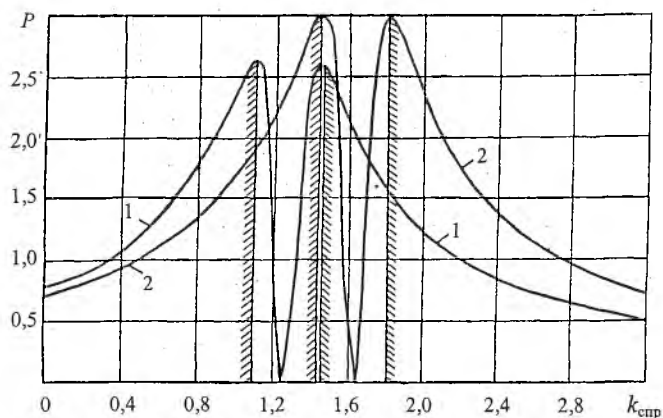


Рис. 4. Зависимости предела передаваемой мощности от степени продольной компенсации при: 1 -  $x_r = 0,25$ ;  $k_L = 0$ ; 2 -  $x_r = 0,5$ ;  $k_L = 0,5$

Двум возможным направлениям (видам компенсации индуктивного сопротивления ЛЭП) посредством сосредоточенных устройств и равномерно распределенной емкостной проводимости будут соответствовать свои технико-экономические показатели. Важно каждому выбранному варианту дать экономическую оценку. Приведем пример такой оценки [1] на основе опыта проектирования электропередачи «Куйбышев – Москва», для которой был предусмотрен и осуществлен комплекс мероприятий повышения ее пропускной способности. Проведем сравнительные экономические подсчеты для этих мероприятий (табл. 1), (расчеты выполнены в ценах 1965 г. в рублях).

Таблица 1

**Повышение пропускной способности электропередачи «Куйбышев – Москва»**

Мероприятие	Пропускная способность системы передачи, МВт	Повышение пропускной способности от данной меры, МВт
1. Отсутствие мер повышения	350	–
2. Расщепление проводов на 3	500	150
3. То же, что в п. 2, и уменьшение реактивного сопротивления трансформатора с 17 до 11 %	615	115
4. То же, что в п. 3, и уменьшение переходного сопротивления генератора с 30 до 20 %	710	95
5. То же, что в п. 4, и продольная компенсация индуктивного сопротивления линии на 40 %	1170	460

Уменьшения относительного индуктивного сопротивления генераторов и трансформаторов можно достичь конструктивным путем или выбором генераторов и трансформаторов обычной конструкции с обычными индуктивными сопротивлениями, отнесенными к их собственной мощности, но имеющими большую, чем передаваемая, номинальную мощность. Уменьшение относительного сопротивления генераторов и трансформаторов конструктивным путем почти равноценно скрытому увеличению их мощности [4]. Поэтому в ориентировочных экономических расчетах повышение стоимости машин конструктивным путем можно учитывать как увеличение их номинальной мощности.

В данном случае уменьшение реактивного сопротивления трансформаторов с 17 до 11 % соответствует увеличению их номинальной мощности на повышающей и понижающей подстанциях на величину

$$\Delta S_T = \left( \frac{17}{11} - 1 \right) (S_{T1} + S_{T2}) = \left( \frac{17}{11} - 1 \right) \cdot (1080 + 1480) = 1395 \text{ МВ} \cdot \text{А},$$

где  $S_{T1}$  и  $S_{T2}$  – принятые номинальные мощности трансформаторов понижающей и повышающей подстанций.

Увеличение номинальной мощности трансформаторов требует дополнительных капитальных затрат

$$\Delta K_T = 1395 \cdot 10^3 \text{ кВ} \cdot \text{А} \cdot 3,6 \text{ руб/кВ} \cdot \text{А} = 5,03 \text{ млн руб.}$$

Таким образом, на каждый киловатт увеличения пропускной способности системы передачи приходится капитальные затраты

$$\Delta K_{\text{г}} = \frac{5,03 \cdot 10^6}{115 \cdot 10^3} = 43,7 \text{ руб/кВт.}$$

Аналогично для генераторов:

$$\Delta S_{\text{г}} = \left( \frac{30}{20} - 1 \right) \cdot 1480 = 740 \text{ МВ·А;}$$

$$\Delta K_{\text{г}} = 740 \cdot 10^3 \cdot 13,9 = 9,62 \text{ млн руб;}$$

$$\Delta K_{\text{г}} = \frac{9,62 \cdot 10^6}{95 \cdot 10^3} = 101,0 \text{ руб/кВт.}$$

Для продольной компенсации:

$$\Delta K_{\text{кк}} = 5,9 \text{ млн руб;}$$

$$\Delta K_{\text{кк}} = \frac{5,9 \cdot 10^6}{460 \cdot 10^3} = 12,5 \text{ руб/кВт.}$$

Определим такой же показатель для расщепления проводов. Удорожание от расщепления составит, согласно [5], 15–20 % стоимости линии. Тогда

$$\Delta K_{\text{р}} = 1,8 \cdot 44 \cdot 10^3 \cdot 850 \cdot \left( 1 - \frac{1}{1,2} \right) = 11,3 \text{ млн руб;}$$

$$\Delta K_{\text{р}} = \frac{11,3 \cdot 10^6}{150 \cdot 10^3} = 75,0 \text{ руб/кВт.}$$

При этом стоимость второй цепи принята равной 80 % стоимости первой цепи.

Если для повышения пропускной способности сооружена дополнительная цепь, то ориентировочно

$$\Delta K_{\text{д}} = 0,8 \cdot 44,0 \frac{\text{тыс. руб}}{\text{км}} \cdot 850 \text{ км} + 2,8 \cdot 10^6 = 32,8 \text{ млн руб.}$$

Второе слагаемое соответствует стоимости выключателей

$$\Delta K_{\text{щ}} = \frac{32,8 \cdot 10^6}{17,5 \cdot 10^3} = 187,0 \text{ руб/кВт.}$$

Для сравнения результаты представлены в табл. 2.

Самой экономичной из рассмотренных мероприятий оказалась продольная конденсаторная компенсация. Сравнительно с уменьшением сопротивления генераторов экономически оправдывается уменьшение сопротивления трансформаторов до 11 %. Расщепление проводов обходится дороже, чем продольная компенсация и уменьшение сопротивления трансформаторов, но оно необходимо как мероприятие против коронирования

проводов. Уменьшение переходного сопротивления генераторов в условиях продольной компенсации явно неэкономично.

Таблица 2

**Удельные стоимости мероприятий повышения пропускной способности системы передачи**

Мероприятие	Стоимость мероприятия на 1 кВт увеличения пропускной способности, руб
1. Дополнительная цепь	187,0
2. Уменьшение переходного сопротивления генераторов с 30 до 20 %	101,0
3. Расщепление проводов	75,0
4. Уменьшение сопротивления трансформаторов с 17 до 11 %	43,5
5. Продольная компенсация индуктивного сопротивления линии на 40 %	12,5

**ВЫВОДЫ**

1. Изменение параметров системы передачи в желаемом направлении (регулирование параметров) – наиболее радикальное средство повышения дальности и мощности передачи электроэнергии, позволяющее существенно улучшить технико-экономические показатели электропередачи. Регулирование параметров протяженной электропередачи включает регулирование ее режимных параметров – напряжений и перетоков реактивной мощности и регулирование ее схемных параметров – реактивного сопротивления и емкостной проводимости линий электропередачи.

2. Можно выделить два различных способа регулирования параметров электропередачи: во-первых, с помощью устройств компенсации или настройки (синхронных компенсаторов, батарей статических конденсаторов, реакторов – управляемых и неуправляемых, статических источников реактивной мощности и др.) и, во-вторых, за счет равномерно распределенной собственной емкостной проводимости линии электропередачи.

3. Исследование зависимости предела передаваемой мощности от степени продольной компенсации позволило уточнить эту зависимость (рис. 1–4). В частности, выявлены две ее ветви и соответственно два значения предельной степени продольной компенсации по пределу передаваемой мощности; эти значения могут быть определены по формуле (8). Полученные уточнения показали возможности использования для повышения пропускной способности системы передачи перекompенсации индуктивного сопротивления ЛЭП, также конкретизированы зависимости предельной передаваемой мощности от эквивалентных сопротивлений генераторов и трансформаторов и проводимостей линий (рис. 2). Влияние емкостной проводимости линии электропередачи на рассматриваемую зависимость характеризуется кривыми, представленными на рис. 4, 3. Проводимости ЛЭП нарушают симметрию ветвей зависимости предела передаваемой мощности от степени продольной компенсации, в частности максимумы предела передаваемой мощности для двух ветвей одной и той же зависимости могут иметь различные значения (рис. 3). Эти особенности необходимо иметь в виду при конкретном проектировании электропередачи.



## ЛИТЕРАТУРА

1. П о с п е л о в Г. Е. Элементы технико-экономических расчетов систем электропередач. – Мн.: Вышэйш. шк., 1967.
2. П о с п е л о в Г. Е. Возможности компенсации индуктивного сопротивления ЛЭП переменного тока равномерно распределенной емкостью // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2001. – № 4. – С. 31–37.
3. З а р у д с к и й Г. К. Исследование протяженных электропередач сверхвысокого напряжения при глубокой компенсации параметров: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1971. – 26 с.
4. Ж д а н о в П. С. Устойчивость электрических систем. – М.: Госэнергоиздат, 1948. – 399 с.
5. Ж д а н о в П. С., В е н и к о в В. А., Р о з а н о в Г. М. Электропередача 400 кВ переменного тока // Электричество. – 1948. – № 11. – С. 3–12.

Представлена кафедрой  
электрических систем

Поступила 15.04.2005

УДК 621.311.019.3

### **К ВОПРОСУ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ АПК В УСЛОВИЯХ РАЗВИТИЯ РЫНОЧНЫХ ОТНОШЕНИЙ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ**

Канд. техн. наук, доц. **КУЩЕНКО Г. Ф.**,  
асп. ПУХАЛЬСКАЯ О. Ю., инж. ПОЛОЗОВА О. А.

*УО «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»*

Вопросы, затронутые в [1, 2], актуальны и для потребителей агропромышленного комплекса (АПК). Прежде бытовало мнение, что сельскохозяйственное производство нечувствительно к перерывам в электроснабжении и ущерб от них незначителен. В настоящее время существенно возрастают требования к надежности электроснабжения потребителей сельскохозяйственного назначения. Еще более высокие требования предъявляют современные предприятия АПК по выработке продуктов животноводства на промышленной основе. По характеру производственных процессов такие предприятия приближаются к современному промышленному производству, внезапное прекращение электроснабжения ведет к дезорганизации производства и значительному материальному ущербу. Необходимо считаться и с неудобствами, которые испытывает население сел и деревень при перерывах в электроснабжении.

Требования к надежности электроснабжения потребителей АПК повышаются по мере совершенствования современных рыночных экономических отношений между энергосистемой и потребителями.

Под рыночными отношениями понимается система экономического взаимодействия, обеспечивающая энергетическим предприятиям хозяйственную самостоятельность, в условиях которой они способны принимать самостоятельные решения, проявлять хозяйственную инициативу, исполь-