

ЛИТЕРАТУРА

1. N a v a r d, D. G. Detuning for controlling galloping of single conductor transmission lines / D. G. Navard // IEEE, Symposium on Mechanical Oscillations of Overhead Transmission Lines, 1979, paper No. A79 500-0.
2. П у с т ы л ь н и к о в, Л. Д. Метод гашения пляски проводов / Л. Д. Пустыльников, В. А. Шкапцов // Известия Академии наук. Энергетика. – 1992. – № 6. – С. 74–81.
3. С е р г е й, И. И. Численный метод расчета пляски одиночных проводов воздушных ЛЭП, оснащенных механическими гасителями колебаний / И. И. Сергей, П. И. Климкович, Ю. Л. Цветков // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2002. – № 5. – С. 3–10.
4. T h e S i m u l a t i o n Method of Galloping of Overhead Transmission Line. – Technical Laboratory of the Hokkaido Electric Power Co. Ltd. – Joint Meeting of UNIPEDE, CORECH-Galloping, 1983, Kyoto, Japan.
5. С е р г е й, И. И. Математическое моделирование гасителей колебаний расщепленных проводов воздушных ЛЭП / И. И. Сергей // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1999. – № 6. – С. 21–32.
6. S t a t e of the Art of Conductor Galloping. A Complementary Document to «Transmission Line Reference Book – Wind-induced conductor motion. Chapter 4: Conductor Galloping». Based on EPRI Research project 792. Task Force B2.11.06. June 2007. CIGRE.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 06.06.2009

УДК 621.315

ВЛИЯНИЕ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ПРИСОЕДИНЕНИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Засл. деятель науки и техн. РБ, докт. техн. наук, проф. ПОСПЕЛОВ Г. Е.

Белорусский национальный технический университет

В электроэнергетике отмечается определяющая ее развитие тенденция интегрирования международных электроэнергетических систем в объединения – большие системы для получения дополнительных эффектов от их совместной работы. В создании объединенных систем большую роль играют электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения. Однако с увеличением протяженности линий электропередачи усложняются условия совместной работы линии с присоединенными к ней энергосистемами, в частности проблемы обеспечения статической и динамической устойчивости, режимов напряжения и технико-экономических характеристик. Этим проблемам систем электропередачи уделяется внимание в данной статье при рассмотрении влияния на их работу промежуточных присоединений. Для электроэнергетической системы активные мощности электростанций могут быть представлены в виде [1]

$$P_i = E_i^2 y_{ii} \sin \alpha_{ii} + E_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_j y_{ij} \sin(\delta_{ij} - \alpha_{ij}), \quad (1)$$

где ($i = 1, 2, \dots, n$); δ_{ij} – углы расхождения роторов i - и j -машин; y_{ii}, y_{ij} – собственные и взаимные проводимости; α_{ii}, α_{ij} – дополнительные углы проводимостей.

Изменения углов δ_{ij} определяются дифференциальными уравнениями

$$M \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = P_{0i} - E_i^2 y_{ii} \sin \alpha_{ii} + E_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_j y_{ij} \sin(\delta_{ij} - \alpha_{ij}). \quad (2)$$

Из (1) и (2) следуют зависимости активных мощностей электростанций и углов δ от проводимостей y_{ij} , которые в свою очередь зависят не только от схемы электрической сети, но и от мощности и характеристик нагрузки.

Рассмотрим, прежде всего, влияние величины местной нагрузки на пропускную способность электропередачи, на которую работает удаленная электростанция. Местной будем называть нагрузку, питаемую от генераторных шин отправного конца системы электропередачи; за счет этой нагрузки установленную мощность передающей электростанции потребуется увеличить по сравнению со случаем отсутствия местной нагрузки. Величина относительного реактивного сопротивления генератора передающей электростанции на базе передаваемой мощности соответственно уменьшится и вырастет величина мощности, устойчиво передаваемой по линии.

Ориентировочная оценка увеличения передаваемой мощности или дальности передачи за счет указанного уменьшения относительного реактивного сопротивления генераторов видна из представленных на рис. 1 зависимостей дальности передачи от величины местной нагрузки, выраженной в долях передаваемой мощности.

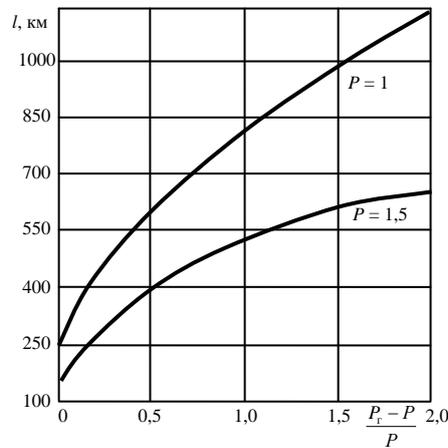


Рис. 1. Зависимости дальности передачи от мощности местной нагрузки

Для построения зависимостей были приняты обычные параметры генераторов и трансформаторов. Предполагалось также отсутствие каких-либо специальных мер повышения дальности, принималась только полная компенсация емкостной проводимости отправного конца П-образной схемы замещения линий передачи шунтирующими реакторами, установленными в начале линии, емкостная проводимость приемного конца использовалась для приемника.

Из рис. 1 видно, что наличие местной нагрузки значительно увеличивает дальность передачи. Анализ [1–3] свидетельствует о безусловно благоприятном влиянии местной нагрузки, при которой требуется установка дополнительной мощности генераторов передающей станции, что вызывает уменьшение величины относительного реактивного сопротивления генератора. Кроме того, местная нагрузка, подобно шунтирующему реактору, частично компенсирует емкостную проводимость линии. Местная нагрузка, расширяя пределы дальности передачи, улучшает экономические характеристики передачи, приближая их к экономическим показателям обычных электропередач, без применения каких-либо специальных средств повышения дальности. Аналогичный результат получается и для электропередач с промежуточными отборами мощности и присоединениями [2]. Имеется мнение [4, 2] о целесообразности устройства вдоль электропередачи через 250–300 км подстанций, связывающих ее с сетями и электростанциями прилегающих районов.

Кроме отмеченного выше положительного влияния местной и промежуточной нагрузки, на систему передачи в известной степени [3, 5–9] влияет регулирующий эффект нагрузки [3, 5, 6]. В частности, исследования [3] установили, что высоким регулирующим эффектом как по активной, так и по реактивной мощности обладает ртутно-выпрямительная нагрузка, работающая на противоЭДС. Влияние регулирующего эффекта других видов нагрузки имеет второстепенное значение по сравнению с увеличением пропускной способности за счет увеличения номинальной мощности генераторов в связи с появлением нагрузки. Влияние местной нагрузки на динамическую устойчивость невелико, оно обуславливается тормозящим действием нагрузки на генераторы.

Для повышения динамической устойчивости может быть использован избыток реактивной мощности системы электропередачи, которым она располагает в режимах передачи мощности, менее натуральной.

Для устранения ряда известных отрицательных явлений за счет этого избытка в электрических сетях электроэнергетических систем применяются компенсаторы реактивной мощности, подключаемые к линиям электропередачи. Простейшими компенсаторами служат шунтирующие реакторы.

При авариях, в частности при коротких замыканиях на линиях, отключается поврежденная цепь линии или, если на линии имеются переключательные пункты, поврежденная секция электропередачи. Это приводит к увеличению эквивалентного сопротивления линии электропередачи в послеаварийном режиме и соответственно к снижению уровня динамической устойчивости и статической устойчивости послеаварийного режима.

Снижение устойчивости может быть скомпенсировано, если вместе с поврежденной цепью линии или при наличии переключательных пунктов с ее поврежденной секцией отключать часть реакторов. Такое отключение вызовет мгновенное повышение напряжения электропередачи, уменьшит послеаварийный толчок и будет способствовать повышению динамической устойчивости. Для электропередачи протяженностью 500–900 км, как показали расчеты, предел динамической устойчивости увеличится на 16–54 %.

Для обобщенной оценки этого эффекта рассмотрим обычную систему передачи, состоящую из удаленной электростанции, повышающей под-

станции, линии передачи, подключенной к шинам приемной системы. Показано [2], что для исследования устойчивости, пропускной способности, перенапряжений, токов коротких замыканий можно в системах передачи не учитывать активные сопротивления и проводимости. Поэтому для рассматриваемой системы передачи в относительных единицах на базе натуральной мощности эквивалентное сопротивление составит

$$x = x_r \cos \alpha l + \sin \alpha l + x_r b \sin \alpha l, \quad (3)$$

где x_r – эквивалентное суммарное реактивное сопротивление генераторов и трансформаторов; α – коэффициент изменения фазы на единицу длины; b – проводимость шунтирующего реактора.

При отключении части мощности шунтирующего реактора проводимостью b_0 эквивалентное сопротивление системы передачи рассчитаем

$$x' = x_r \cos \alpha l + \sin \alpha l + x_r (b - b_0) \sin \alpha l. \quad (4)$$

Из (3) и (4) найдем величину эквивалентного реактивного сопротивления системы передачи в послеаварийном режиме в долях эквивалентного реактивного сопротивления нормативного режима

$$\chi = \frac{x'}{x} = \frac{x_r \cos \alpha l + \sin \alpha l + x_r (b - b_0) \sin \alpha l}{x_r \cos \alpha l + \sin \alpha l + x_r b \sin \alpha l}. \quad (5)$$

Величина χ , как показано в [10, 11], может быть весьма эффективным средством управления динамическим переходом систем электропередачи. Соответственно она дает возможность обеспечить необходимую пропускную способность системы электропередачи в послеаварийном режиме. Кроме способов, указанных в [10], величина χ согласно (5) может регулироваться за счет управления устройствами поперечной компенсации. Для параметров системы передачи Самара – Москва при отключении $b_0 = b = 0,76$ получилось увеличение пропускной способности на 26,5 %.

Однако при использовании этого средства необходимо производить проверку на повышение напряжения в начале линии электропередачи.

Напряжение в точке «к» линии передачи

$$\dot{U}_k = \dot{A}_k \dot{U}_2 + \dot{B}_k \dot{I}_2, \quad (6)$$

где с индексом «к» – обобщенные постоянные линии от ее приемного конца до точки «к»; \dot{U}_2 и \dot{I}_2 – напряжение и ток приемного конца.

Аналогично представим ЭДС генераторов за переходным сопротивлением

$$\dot{E}'_d = \dot{A} \dot{U}_2 + \dot{B} \dot{I}_2, \quad (7)$$

где A и B – соответствующие обобщенные постоянные.

Из выражений (6) и (7) найдем

$$\dot{U}_k = \frac{\dot{A}_k \dot{B} - \dot{A} \dot{B}_k}{\dot{B}} \dot{U}_2 + \frac{\dot{B}_k \dot{E}'_d}{\dot{B}}. \quad (8)$$

Полагая $U_2 = 1$ и $\dot{E}'_d = E'_d \angle \Theta$, для линии электропередачи без потерь величину напряжения в точке «к» получим в виде

$$U_k = \frac{\sqrt{(A_k B - AB_k + B_k E'_d \cos \Theta)^2 + B_k^2 (E'_d)^2 \sin^2 \Theta}}{B}. \quad (9)$$

Если до точки «к» линия не содержит компенсирующих устройств, то $A = \cos \alpha l$; $B_k = \sin \alpha l$ и вместо (9) получим

$$U_k = \frac{\sqrt{(B \cos \alpha l - A \sin \alpha l + E'_d \cos \Theta \sin \alpha l)^2 + (E'_d)^2 \sin^2 \Theta \sin^2 \alpha l}}{B}. \quad (10)$$

Расчеты по (10) показывают, что для заданного угла Θ максимальное значение напряжения в линии имеет место в некотором отдалении от ее начала. Это максимальное значение напряжения очень мало отличается от напряжения в начале линии непосредственно за повышающим трансформатором. Так как конечные устройства линии передачи в отношении изоляции являются более слабыми элементами, чем линия, то больший интерес представляет напряжение в ее начале.

Для принятых параметров электропередачи ($l = 900$ км) при $\Theta = 30^\circ$ напряжение в начале линии получилось $U_1 = 1,35$ – недопустимое значение.

Устранения этого повышения напряжения можно достичь применением двух реакторов: основного – отключаемого и второго – стабилизирующего напряжения за счет насыщения сердечника, жестко связанного с линией. При отключении основного реактора напряжение линии повышается и стабилизирующий реактор благодаря увеличению своей проводимости, а следовательно, и мощности удерживает напряжение на определенном уровне. По мере увеличения угла Θ величина напряжения в начале линии U_1 падает, а проводимость стабилизирующего реактора уменьшается. Следовательно, при больших значениях угла Θ система электропередачи работает как бы с отключенным реактором и преимуществами этого отключения. При повышении напряжения U_1 система работает, как с реактором, компенсирующим емкость линии и уменьшающим предел повышения напряжения.

Для количественной характеристики воспользуемся результатами конкретных расчетов, методика которых состоит в следующем. Предположим, что сердечник стабилизирующего реактора выполнен из стандартной трансформаторной стали. Рабочую часть кривой намагничивания с достаточным приближением можно выразить аналитической функцией вида

$$I_p = aU^\mu, \quad (11)$$

отсюда проводимость реактора

$$b = aU^{\mu-1}. \quad (12)$$

Для некоторого насыщения стали, характеризуемого магнитной индукцией B_0 , $U_1 = 1$ получим $b = a$. Следовательно, a численно равно проводимости реактора при напряжении, равном 1.

Показатель степени μ зависит от первоначального насыщения реактора. Для $B_0 = 1,4 \text{ Вб/м}^2$ $\mu = 8,66$; для $B_0 = 1,5 \text{ Вб/м}^2$ $\mu = 9,03$.

В табл. 1 даны результаты расчетов для электропередачи $l = 900 \text{ км}$, показывающие благоприятное действие стабилизирующего реактора. Напряжение на зажимах повышающего трансформатора при малых углах Θ снижается. Случай $a = 0$ соответствует полному отключению реакторов.

Таблица 1

$B,$ Вб/м^2	$a = 0; B = 1,5$					$a = 0,005; B = 1,5$					$a = 0,1; B = 1,5$				
Θ°	30	50	70	90	110	30	50	70	90	110	30	50	70	90	110
U_1	1,33	1,27	1,17	1,06	0,90	1,20	1,16	1,07	1,00	0,90	1,14	1,12	1,07	1,03	0,90
$B,$ Вб/м^2	$a = 0; B = 1,4$					$a = 0,1; B = 1,4$					$a = 0,15; B = 1,4$				
Θ°	30	50	70	90	110	30	50	70	90	110	30	50	70	90	110
U_1	1,34	1,27	1,17	1,06	0,90	1,17	1,15	1,10	1,02	0,90	1,14	1,11	1,07	0,99	0,90

Выбором проводимости реактора a и первоначального насыщения сердечника реактора B можно добиться не превышения заданного максимального уровня напряжения за счет стабилизирующего свойства реактора. Рациональные значения B_0 и a должны определяться для конкретных условий электропередачи с учетом конструктивных возможностей построения стабилизирующего реактора.

Данные табл. 1 показывают благоприятное действие стабилизирующего реактора – напряжение на зажимах повышающего трансформатора при малых углах Θ снижается.

Наиболее благоприятно рассматриваемую задачу будут решать статические тиристорные компенсаторы (СТК). Эти многофункциональные устройства повышают статическую и динамическую устойчивость, снижают потери электроэнергии, ограничивают коммутационные перенапряжения, улучшают условия гашения дуги в паузу ОАПВ, симметрируют неполнофазные режимы, демпфируют качания передаваемой по линиям мощности.

Перспективным средством для улучшения режимов электроэнергетических систем и рационального использования избытков реактивной мощности, в том числе и для повышения динамической устойчивости следует признать управляемые реакторы. Компенсаторы реактивной мощности должны быть одними из основных элементов электроэнергетических систем.

Номинальная мощность компенсаторов реактивной мощности определяется режимом холостого хода. Длина участка линии между двумя пунктами установки компенсаторов реактивной мощности не должна превышать 600 км. Мощность компенсатора реактивной мощности должна компенсировать зарядную мощность половины длины соответствующих участков линий электропередачи. Компактные линии электропередачи потребуют вдвое большую мощность компенсаторов реактивной мощности по сравнению с обычными линиями электропередачи.

Использование емкостного эффекта за счет избытков реактивной мощности электроэнергетической системы позволяет осуществлять уменьше-

ние эквивалентного реактивного сопротивления систем передачи в послеаварийных режимах. Это дает повышение динамической и статической устойчивости послеаварийных режимов электроэнергетических систем. Совместно с послеаварийной конденсаторной компенсацией использование емкостного эффекта линий передачи позволяет снять ограничение пропускной способности систем электропередачи по динамической устойчивости.

ВЫВОДЫ

1. Промежуточные отборы мощности в системах электропередачи переменного тока, в том числе и местная нагрузка электростанции, оказывают положительное влияние на возможности электропередачи (рис. 1).

Промежуточная нагрузка повышает статическую устойчивость системы передачи, улучшает ее технико-экономические характеристики.

2. На динамическую устойчивость систем электропередачи она оказывает значительно меньшее влияние, чем на их статическую устойчивость.

Динамическая устойчивость систем электропередачи может быть повышена за счет использования емкостного эффекта линии. В этом случае должны быть использованы какие-либо устройства поперечной компенсации – шунтирующие реакторы, статические тиристорные компенсаторы, управляемые шунтирующие реакторы.

ЛИТЕРАТУРА

1. П о с п е л о в, Г. Е. Техничко-экономические характеристики дальних электропередач с промежуточными присоединениями / Г. Е. Поспелов, Р. И. Запатрин, Т. Г. Поспелова. – Минск: Наука и техника, 1983.
2. П о с п е л о в, Г. Е. Элементы технико-экономических расчетов систем электропередач / Г. Е. Поспелов. – Минск: Вышэйш. шк., 1967.
3. Ф е д о р о в а, И. А. Влияние мощной ртутно-выпрямительной нагрузки на устойчивость системы / И. А. Федорова // Электричество. – 1949. – № 12.
4. В у л ь ф, А. А. Проблема передачи электрической энергии на сверхдальние расстояния по компенсированным линиям / А. А. Вульф. – М.: Госэнергоиздат, 1941.
5. Ф е д о р о в а, И. А. О влиянии некоторых химических производств на статические характеристики узлов нагрузки энергетических систем / И. А. Федорова // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений СССР). – 1964. – № 6.
6. Ф е д о р о в а, И. А. Влияние некоторых видов местной нагрузки на устойчивость дальних электропередач / И. А. Федорова // Электричество. – 1954. – № 4.
7. Н а з а р е н к о в а, Г. А. К вопросу теоретического и экспериментального определения статических характеристик промышленных предприятий / Г. А. Назаренкова // Тр. Новосибирского электротехнического института. – Новосибирск, 1951. – Т. 2.
8. Г у р в и ч, Ю. Г. Устойчивость нагрузки электрических систем / Ю. Г. Гурвич, Л. Г. Либова, Э. А. Хачатрян. – М.: Энергоиздат, 1981.
9. П о с п е л о в, Г. Е. Взаимодействие генераторов электрических станций с линиями электропередачи и приемниками электрической энергии / Г. Е. Поспелов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2001. – № 1.
10. Ф е д о р о в а, И. А. Эффективность средств повышения динамической устойчивости систем электропередач / И. А. Федорова, Г. Е. Поспелов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1990. – № 7.
11. П о с п е л о в, Г. Е. Логическая структура средств повышения динамической устойчивости систем электропередачи / Г. Е. Поспелов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2009. – № 4.

Представлена кафедрой
электрических систем

Поступила 14.04.2009