УДК 621.315.1

ВОЗМОЖНОСТИ КОМПЕНСАЦИИ ИНДУКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЛЭП ПЕРЕМЕННОГО ТОКА РАВНОМЕРНО РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЕМКОСТЬЮ

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

Белорусская государственная политехническая академия

Наиболее естественный путь обеспечения необходимой передаваемой мощности для улучшения технико-экономических показателей электропередачи – компенсация ее параметров.

Характеристика возможностей электропередач, в которых компенсация параметров линии достигается за счет сосредоточенных компенсирующих устройств, достаточно подробно освещена в [1–3 и др.]. В данной статье уделим внимание электропередачам, в которых компенсация осуществляется за счет равномерно распределенных параметров линии. К ним прежде всего относятся разомкнутые и полуразомкнутые ЛЭП, а также так называемые «ЛЭП повышенной натуральной мощности» [4]. Общим свойством этих ЛЭП является то, что часть энергии от одного провода к другому передается посредством электрического поля.

Рассмотрим для примера разомкнутую ЛЭП (рис. 1), цепочечная схема замещения которой представлена на рис. 2.

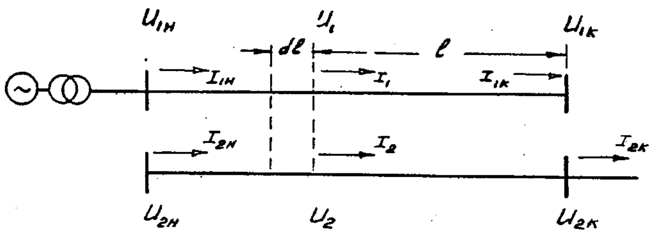

Рис. 1. Схема разомкнутой системы электропередачи

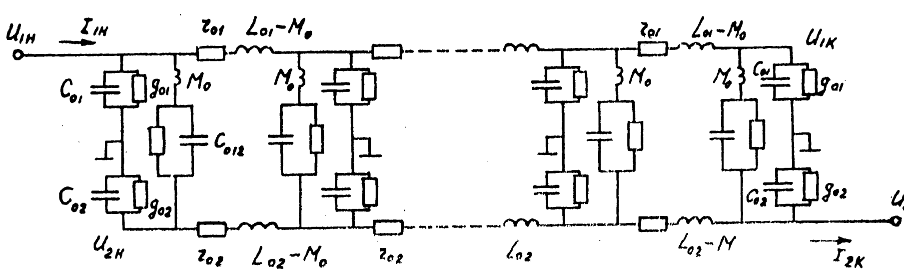

Рис. 2

Каждая фаза такой линии состоит из двух непосредственно электрически не связанных, параллельно размещенных проводов. Один из проводов присоединен к шинам удаленной электростанции, а другой – к шинам приемной системы. Образующаяся между этими проводами равномерно распределенная емкость служит для компенсации индуктивного сопротивления линии. Отсчитывая расстояние от конца линии и выделяя бесконечно малый участок dl (рис. 1), выразим изменения напряжения и тока на единицу длины. Тогда получим дифференциальные уравнения линии электропередачи в виде:

$$\frac{\partial U_1}{\partial \ell} = r_{01} i_1 + L_{01} \frac{\partial i_1}{\partial t} + M_0 \frac{\partial i_2}{\partial t};$$

$$\frac{\partial U_2}{\partial \ell} = r_{02} i_2 + L_{02} \frac{\partial i_2}{\partial t} + M_0 \frac{\partial i_1}{\partial t};$$

$$\frac{\partial i_1}{\partial \ell} = g_{01} U_1 + g_{012}(U_1 - U_2) + C_{01} \frac{\partial U_1}{\partial t} + C_{012} \frac{\partial (U_1 - U_2)}{\partial t};$$

$$\frac{\partial i_2}{\partial \ell} = g_{02} U_2 + g_{012}(U_2 - U_1) + C_{02} \frac{\partial U_2}{\partial t} + C_{012} \frac{\partial (U_2 - U_1)}{\partial t},$$

где индекс 1 относится к проводу отправного конца, а 2 — к проводу приемного конца;

r_{01}, r_{02} — активные сопротивления на 1 км проводов;

L_{01}, L_{02} — индуктивности на 1 км проводов;

M_0 — взаимная индуктивность на 1 км проводов отправного и приемного концов;

g_{01}, g_{02} — активные проводимости проводов на 1 км;

g_{012} — взаимная активная проводимость между проводами передающего и приемного концов;

C_{01}, C_{02} — емкости на 1 км проводов;

C_{012} — взаимная емкость на 1 км между проводами приемного и отправного концов.

Эти дифференциальные уравнения в частных производных определяют процессы, протекающие в рассматриваемой ЛЭП. В общем случае они не решаются средствами современной математики. Они могут быть решены для установившихся значений напряжений и токов в случае подключения электропередачи к синусоидальной ЭДС. Тогда дифференциальные уравнения принимают вид:

$$\frac{\partial \underline{U}_1}{\partial \ell} = (r_{01} + j\omega L_{01})\underline{I}_1 + j\omega M_0 \underline{I}_2;$$

$$\frac{\partial \underline{U}_2}{\partial \ell} = (r_{02} + j\omega L_{02})\underline{I}_2 + j\omega M_0 \underline{I}_1;$$

$$\frac{\partial \underline{I}_1}{\partial \ell} = (g_{01} + j\omega C_{01})\underline{U}_1 + (g_{012} + j\omega C_{012})(\underline{U}_1 - \underline{U}_2);$$

$$\frac{\partial \underline{I}_2}{\partial \ell} = (g_{02} + j\omega C_{02})\underline{U}_2 + (g_{012} + j\omega C_{012})(\underline{U}_2 - \underline{U}_1).$$

В результате решения этих уравнений получим выражения напряжений и токов в любой точке проводов:

$$\underline{U}_1 = \underline{N}_1 \mathrm{ch}\underline{k}_1\ell + \underline{N}_2 \mathrm{sh}\underline{k}_1\ell + \underline{N}_3 \mathrm{ch}\underline{k}_2\ell + \underline{N}_4 \mathrm{sh}\underline{k}_2\ell;$$

$$\underline{U}_1 = \underline{N}_1 \mathrm{ch}\underline{k}_1\ell + \underline{N}_2 \mathrm{sh}\underline{k}_1\ell + \underline{N}_3 \mathrm{ch}\underline{k}_2\ell + \underline{N}_4 \mathrm{sh}\underline{k}_2\ell;$$

$$\underline{I}_1 = \underline{N}_1 \frac{\underline{y}_1}{\underline{k}_1} \mathrm{sh}\underline{k}_1\ell + \underline{N}_2 \frac{\underline{y}_1}{\underline{k}_1} \mathrm{ch}\underline{k}_1\ell + \underline{N}_3 \frac{\underline{y}'_1}{\underline{k}_2} \mathrm{sh}\,\underline{k}_2\ell + \underline{N}_4 \frac{\underline{y}'_1}{\underline{k}_2} \mathrm{ch}\underline{k}_2\ell;$$

$$\underline{I}_2 = \underline{N}_1 \frac{\underline{y}_2}{\underline{k}_1} \mathrm{sh}\underline{k}_1\ell + \underline{N}_2 \frac{\underline{y}_2}{\underline{k}_1} \mathrm{ch}\underline{k}_1\ell + \underline{N}_3 \frac{\underline{y}'_2}{\underline{k}_2} \mathrm{sh}\underline{k}_2\ell + \underline{N}_4 \frac{\underline{y}'_2}{\underline{k}_2} \mathrm{ch}\underline{k}_2\ell,$$

где $\underline{k}_1$ и $\underline{k}_2$ — корни характеристического уравнения, могут быть найдены из соотношений:

$$\underline{k}_1 = \sqrt{\frac{\underline{\alpha}^2}{2} + \sqrt{\frac{\underline{\alpha}^4}{4} - \underline{\beta}^2}}; \qquad \underline{k}_2 = \sqrt{\frac{\underline{\alpha}^2}{2} + \sqrt{\frac{\underline{\alpha}^4}{4} - \underline{\beta}^2}};$$

$$\underline{\alpha}^2 = \underline{\gamma}_1^2 + \underline{\gamma}_2^2; \qquad \underline{\beta}^2 = \underline{\gamma}_1^2 \underline{\gamma}_2^2 - \underline{\delta}_1^2 \underline{\delta}_2^2;$$

$$\underline{y}_{\Sigma 1} = g_{01} + j\omega C_{01} + g_{012} + j\omega C_{012}; \qquad \underline{y}_1 = \underline{y}_{\Sigma 1} - \underline{y}_{012}\underline{m};$$

$$\underline{y}_{\Sigma 2} = g_{02} + j\omega C_{02} + g_{012} + j\omega C_{012}; \qquad \underline{y}_{012} = j_{012} + j\omega C_{012};$$

$$\underline{y}'_1 = \underline{y}_{\Sigma 1} - \underline{y}_{012}\underline{n}; \qquad \underline{y}_2 = \underline{y}_{\Sigma 2}\underline{m} - \underline{y}_{012}; \qquad \underline{y}'_2 = \underline{y}_{\Sigma 2}\underline{n} - \underline{y}_{012};$$

$$\underline{m} = \frac{\underline{\gamma}_1^2 - \underline{k}_1^2}{\underline{\delta}_2^2}; \qquad \underline{n} = \frac{\underline{\gamma}_1^2 - \underline{k}_2^2}{\underline{\delta}_2^2};$$

$$\underline{z}_{01} = r_{01} + j\omega L_{01}; \qquad \underline{z}_{02} = r_{02} + j\omega L_{02}.$$

Постоянные интегрирования N_1, N_2, N_3, N_4 определились через $\underline{U}_{2k}$ и $\underline{I}_{2k}$ — напряжение и ток конца линии электропередачи выражениями:

$$\underline{N}_1 = \frac{\underline{U}_{2k} - \underline{N}_3\underline{n}}{\underline{m}}; \quad \underline{N}_2 = -\frac{\underline{I}_{2k}\,\underline{y}'_1 k_1}{\underline{y}'_2 \underline{y}_1 - \underline{y}'_1 \underline{y}_2}; \quad \underline{N}_4 = -\frac{\underline{I}_{2k}\,\underline{y}_1 k_2}{\underline{y}'_2 \underline{y}_1 - \underline{y}'_1 \underline{y}_2};$$

$$\underline{N}_3 = \frac{\underline{U}_{2k} \dfrac{\underline{y}_1}{\underline{m}\underline{k}_1} \mathrm{sh}\underline{k}_1\ell + \underline{I}_{2k} \dfrac{\underline{y}_1 \underline{y}'_2 \mathrm{ch}\underline{k}_2\ell - \underline{y}'_1 \underline{y}_2 \mathrm{ch}\underline{k}_1\ell}{\underline{y}_1 \underline{y}'_2 - \underline{y}'_1 \underline{y}_2}}{\dfrac{\underline{n}}{\underline{m}} \dfrac{\underline{y}_1}{\underline{k}_1} \mathrm{sh}\underline{k}_1\ell - \dfrac{\underline{y}'_2}{\underline{k}_2} \mathrm{sh}\underline{k}_2\ell}.$$

При некоторой длине линии взаимная емкость проводов отправного и приемного концов может полностью скомпенсировать индуктивное сопротивление линии электропередачи. Эта длина названа длиной продольной самокомпенсации [4]. Условия и длина самокомпенсации определены [5]. При автоматическом регулировании возбуждения генераторов сильного действия, когда по концам линии электропередачи обеспечивается постоянство напряжений, не следует стремиться к полной самокомпенсации, так как это приводит к снижению предела передаваемой мощности [6]. Как видно из рис. 3 (кривая 1), где построена зависимость предела передаваемой мощности от степени продольной компенсации, до значения степени компенсации 0,83 предел передаваемой мощности увеличивается, а с дальнейшим ее повышением резко уменьшается. При степени компенсации, равной единице, т. е. при полной самокомпенсации, предел передаваемой мощности падает до нуля. Кривая 1 соответствует АРВ генераторов сильного действия — постоянству напряжений по концам линии ($x_г = 0$), работе линии без перепада напряжений; кривая 2 — АРВ пропорционального действия, постоянству ЭДС за переходным сопротивлением ($x_г = 0,42$). Остановимся более подробно на свойствах такой электропередачи, названной вполне компенсированной [6].

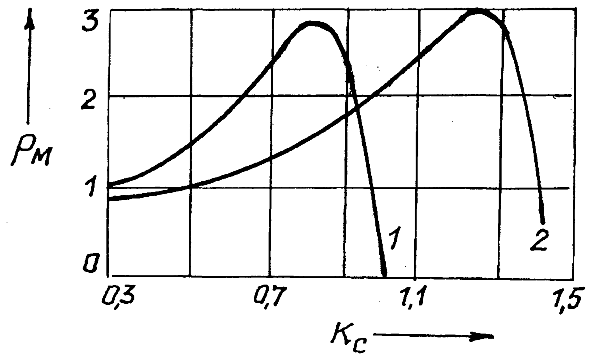

Рис. 3. Зависимости предела передаваемой мощности от степени продольной компенсации: 1 — при АРВ сильного действия; 2 — при АРВ пропорционального типа

При достаточно малой или компенсированной емкостной проводимости линии мощность, отдаваемая генераторами передающей станции,

$$P_1 = \frac{E^2}{z}\sin\alpha + \frac{EU}{z}\sin(\Theta - \alpha),$$

где z — индуктивно-активное сопротивление системы электропередачи,

$$\alpha = 90° - \varphi;$$

φ — фазовый угол сопротивления.

Для вполне компенсированной системы электропередачи $z = r$, $\alpha = 90°$:

$$P_1 = \frac{E^2}{z} - \frac{EU}{z}\cos\Theta$$

и синхронизирующий момент

$$S = \frac{\partial P_1}{\partial \Theta} = \frac{EU}{r}\sin\Theta,$$

где r — активное сопротивление системы электропередачи.

Для устойчивости параллельной работы необходимо, чтобы

$$\sin\Theta > 0.$$

Мощность на приемном конце вполне компенсированной системы передачи

$$P_2 = \frac{EU}{r}\cos\Theta - \frac{U^2}{r}.$$

Согласно условию $\sin\Theta > 0$, граничными точками, определяющими зону устойчивости работы, являются $\Theta = 0$ и $\Theta = 180^\circ$. При $\Theta = 90^\circ$:

$$P_1 = \frac{E^2}{r}; \quad P = -\frac{U^2}{r},$$

а синхронизирующий момент имеет наибольшее значение. Но режим электропередачи получается при этом неудовлетворительным, так как энергия, отдаваемая передающей станцией и приемной системой, полностью поглощается в активном сопротивлении системы электропередачи.

На рис. 4 представлены зависимости P_1, P_2, η (КПД) от угла Θ. Величины U, E, P_1 и P_2 даны в относительных единицах. При построении кривых было принято $U = 1$, $r = 0{,}1$. Пунктиром изображены кривые для случая $E = 1{,}05$, а сплошными линиями – для $E = 1{,}20$.

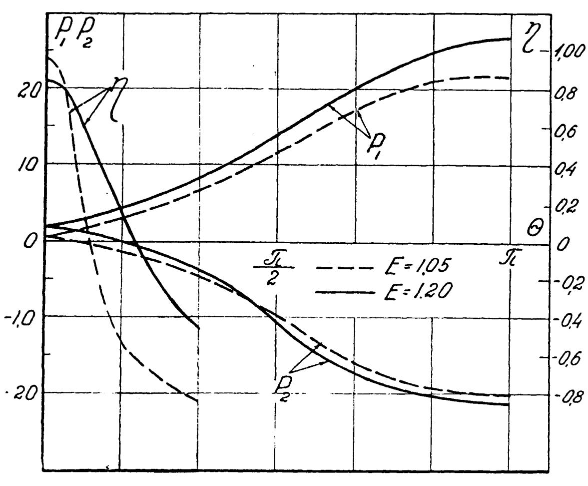

Рис. 4

Анализ рис. 4 показывает, что вполне компенсированная электропередача не может найти практического применения ввиду неудовлетворительности своих характеристик. Например, при наибольшем значении КПД

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U}{E},$$

который может быть определен из соотношения

$$P_1 = \frac{E^2}{r} - \frac{EU}{r} = EI$$

и

$$P_2 = \frac{EU}{r} - \frac{U^2}{r} = UI,$$

синхронизирующий момент равен нулю, т. е. условие устойчивости параллельной работы не соблюдается.

Отсюда следует, что вполне компенсированная система передачи не может быть использована для передачи энергии. Из рис. 3, кривой 1, которая соответствует сильному регулированию возбуждения генераторов ($x_г = 0$) и постоянству напряжения по концам линии, предельная степень продольной компенсации получается меньше единицы (примерно 0,8). При отсутствии сильного регулирования, когда в схеме замещения системы передачи для оценки ее пропускной способности имеются индуктивные сопротивления генераторов и трансформаторов, самокомпенсация индуктивного сопротивления линии оказывается целесообразной, так как она приводит к повышению пропускной способности системы передачи; это видно из кривой 2 рис. 3, которая построена для условий постоянства ЭДС за переходным сопротивлением генераторов ($x'_г = 0{,}42$). В этом случае так же, как и при постоянстве ЭДС за синхронным сопротивлением генераторов, предельная степень компенсации может быть больше единицы.

Таким образом, с точки зрения предельной мощности имеется широкий диапазон степени продольной компенсации, достаточный для электропередачи на большие расстояния.

Явление самораскачивания синхронных машин не ограничит указанной предельной компенсации. Согласно опытам и теоретическим исследованиям оно может быть устранено при помощи демпферной обмотки. Было показано [7], что для машины, не имеющей демпферных контуров, основным условием самораскачивания является соотношение

$$\mathrm{tg}\Theta_0 < \mathrm{ctg}\varphi = \frac{r}{x}, \qquad (1)$$

где Θ_0 — угловой сдвиг между ЭДС генератора и напряжением шин постоянной частоты и постоянного напряжения, на которое работает генератор через индуктивно-активное сопротивление $z \angle \varphi$;

r и x — активная и индуктивная составляющие полного сопротивления цепи статора.

Очевидно, условие (1) не будет выполняться для указанной предельной степени продольной компенсации, т. е. явления самораскачивания при продольной компенсации и значительных нагрузках ожидать не следует.

ВЫВОДЫ

1. Естественная равномерно распределенная емкость ЛЭП может быть использована для компенсации ее индуктивного сопротивления. Простейшими примерами такого использования являются расщепление проводов, разомкнутые и полуразомкнутые ЛЭП, для которых в данной статье получены уравнения.

2. Вполне компенсированная система передачи не может быть использована для транспорта энергии. Имеется предельная степень компенсации, которую не следует превосходить.

3. По условиям предела мощности имеется широкий диапазон степени продольной компенсации, достаточный для электропередачи на большие расстояния.

4. Явление самораскачивания синхронных генераторов не ограничивает указанную предельную степень компенсации индуктивного сопротивления ЛЭП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электрическая передача больших мощностей на дальние расстояния / Под ред. Р. Рюденберга. – М.; Л.: Энергоиздат, 1934.
2. Вульф А. А. Проблема передачи электрической энергии на сверхдальние расстояния по компенсированным линиям. – М.: Госэнергоиздат, 1941.
3. Поспелов Г. Е. Элементы технико-экономических расчетов систем электропередач. – Мн.: Выш. шк., 1967.
4. Веников В. А., Чалый Г. В., Пастолатий В. М. О передаче энергии переменным током повышенной частоты по разомкнутым линиям // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1967. – № 6.
5. Ракушев Н. Ф. Сверхдальняя передача энергии переменным током и по разомкнутым линиям. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1957.
6. Поспелов Г. Е. О предельной компенсации параметров электропередачи // Электричество. – 1952. – № 2.
7. Щедрин Н. Н. Простейшее истолкование явления параметрического самораскачивания синхронной машины, соединенной с шинами постоянного напряжения и постоянной частоты // Тр. ЛПИ. – 1948. – № 3.

Представлена кафедрой
электрических систем

Поступила 2.11.2000