

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ С ЛИНИЯМИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И ПРИЕМНИКАМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

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

Белорусская государственная политехническая академия

Генераторы электрических станций, линии электропередачи и приемники электрической энергии, образуя электроэнергетическую систему, оказывают на работу друг друга взаимное влияние.

Воздействие линии на эквивалентное сопротивление генераторов отмечалось в [1], а автоматических регуляторов возбуждения генераторов на особые точки ЛЭП – в [2]. Уделялось также внимание учету влияния характеристик приемника на работу систем электропередачи [3, 4].

Рассмотрим более детально совместную работу составляющих системы электропередачи (рис. 1) в их взаимодействии.

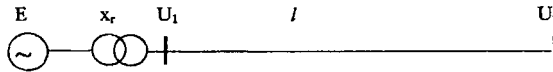


Рис. 1. Схема системы электропередачи

ЭДС генератора (рис. 1) может быть получена из соотношений без учета потерь:

$$\begin{aligned} \underline{E} &= \underline{U}_1 + jI_1 x_r; \\ \underline{U}_1 &= \underline{U}_2 \cos \alpha + jI_2 \sin \alpha; \\ \underline{I}_1 &= \underline{I}_2 \cos \alpha + j \frac{\underline{U}_2}{z_B} \sin \alpha, \end{aligned}$$

или

$$\underline{E} = \underline{U}_2 \left(\cos \alpha - \frac{x_r}{z_B} \sin \alpha \right) + j \underline{I}_2 (x_r \cos \alpha + z_B \sin \alpha), \quad (1)$$

где x_r – суммарное эквивалентное реактивное сопротивление генератора и повышающего трансформатора;

z_B – волновое сопротивление линии;

α – коэффициент изменения фазы волны на единицу длины.

При расчетах и исследованиях пропускной способности, перенапряжений, токов короткого замыкания систем передачи можно для расстояний $l \leq 2000$ км вместо реальной линии рассматривать идеальную без потерь [1, 5]. Поэтому в (1) не учитываются активные сопротивления и проводимости.

Если в (1) выразить ток \underline{I}_2 через комплекс мощности в конце передачи, то ЭДС генераторов удаленной станции представится выражением

$$\underline{E} = \underline{U}_2 \left[\cos \alpha l - \frac{x_r}{z_B} \sin \alpha l + q_2 \left(\frac{x_r}{z_B} \cos \alpha l + \sin \alpha l \right) + jp_2 \left(\frac{x_r}{z_B} + \sin \alpha l \right) \right], \quad (2)$$

где p_2 и q_2 — активная и реактивная мощности в конце электропередачи, выраженные в долях натуральной мощности.

Реактивная мощность в (2) подставляется со знаком плюс, если она отстающая, и минус, если опережающая.

На рис. 2 по (2) построена векторная диаграмма, где напряжение U_2 направлено по действительной оси:

$$\begin{aligned} 0a &= U_2 \left(\cos \alpha l - \frac{x_r}{z_B} \sin \alpha l \right); \\ 0a' &= U_2 \left(\cos \alpha l - \frac{x_r}{z_B} \sin \alpha l + q_2 \frac{x_r}{z_B} \cos \alpha l + q_2 \sin \alpha l \right); \\ ab &= a'b' = U_2 p_2 \left(\frac{x_r}{z_B} \cos \alpha l + \sin \alpha l \right). \end{aligned}$$

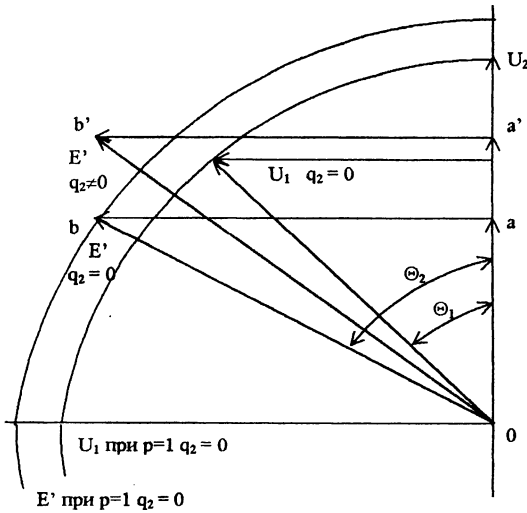


Рис. 2. Векторные диаграммы системы электропередачи

Треугольник $0ab$ соответствует случаю $q_2 = 0$, и треугольник $0a'b'$ построен для $q_2 \neq 0$.

Величина ЭДС и угол Θ определяются выражениями:

$$E = U_2 \sqrt{\left(\cos \alpha l - \frac{x_r}{z_B} \sin \alpha l + q_2 \frac{x_r}{z_B} \cos \alpha l + q_2 \sin \alpha l \right)^2 + p_2^2 \left(\frac{x_r}{z_B} \cos \alpha l + \sin \alpha l \right)^2}; \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \Theta = \frac{p_2 \left(\frac{x_r}{z_B} \cos \alpha l + \sin \alpha l \right)}{\cos \alpha l - \frac{x_r}{z_B} \sin \alpha l + q_2 \frac{x_r}{z_B} \cos \alpha l + q_2 \sin \alpha l}. \quad (4)$$

Полагая в (3) $x_r = 0$, получим напряжение в начале линии

$$U_1 = U_2 \sqrt{(\cos \alpha l + q_2 \sin \alpha l)^2 + p_2 \sin^2 \alpha l}. \quad (5)$$

При передаче натуральной мощности: $p_2 = 1$; $q_2 = 0$ и

$$E = U_2 \sqrt{\left(\cos \alpha l - \frac{x_r}{z_B} \sin \alpha l \right)^2 + \left(\frac{x_r}{z_B} \cos \alpha l + \sin \alpha l \right)^2}; \quad (6)$$

$$\operatorname{tg} \Theta = \frac{\frac{x_r}{z_B} \cos \alpha l + \sin \alpha l}{\cos \alpha l - \frac{x_r}{z_B} \sin \alpha l}. \quad (7)$$

Преобразуя выражение (6), получим

$$E = U_2 \sqrt{1 + \frac{x_r^2}{z_B^2}}. \quad (8)$$

ЭДС за синхронным сопротивлением ($x_r = 1$) и ЭДС за переходным сопротивлением ($x_r = 0,42$) в относительных единицах ($U_{\text{баз}} = U_2$; $P_{\text{баз}} = P_{\text{нат}}$) будут: $E = 1,41$ и $E' = 1,0846$.

Как и следовало ожидать, при передаче натуральной мощности по линии без компенсирующих устройств ЭДС удаленной станции не зависит от дальности передачи. Однако с увеличением дальности при неизменной передаваемой мощности без каких-либо специальных мероприятий коэффициент запаса статической устойчивости системы передачи быстро понижается.

На рис. 3 на основе (7) построена зависимость коэффициента запаса статической устойчивости

$$z_c = \frac{P_M - P_0}{P_0}$$

от дальности при передаче натуральной мощности ($E' = \text{const}$).

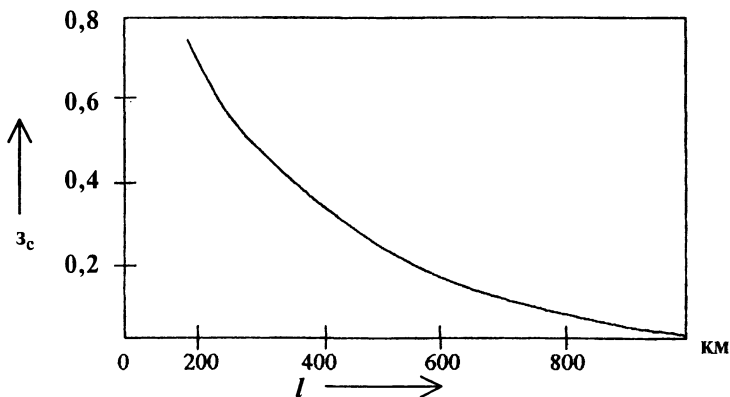


Рис. 3

При сохранении коэффициента запаса статической устойчивости на определенном уровне передаваемая мощность системы без средств повышения устойчивости с увеличением дальности быстро уменьшается, соответственно изменяется ЭДС генераторов. При различной дальности передачи векторы ЭДС генераторов передающей станции, соответствующие максимальным режимам, будут располагаться на прямой, проведенной к вектору U_2 под углом Θ (рис. 4), причем этот угол определится коэффициентом запаса статической устойчивости. На рис. 4 прямая ЭДС E проведена под углом, для которого $\text{tg}\Theta = 1,5$, что соответствует коэффициенту запаса статической устойчивости $z_c = 0,20$.

Величина ЭДС и коэффициент запаса статической устойчивости, как видно из рис. 2, выражений (3) и (4), могут быть увеличены за счет передачи по линии потока реактивной мощности.

При заданной дальности и передаваемой мощности повышение номинального напряжения и соответственно натуральной мощности линии приведет к уменьшению значений:

$$p = \frac{P}{P_{\text{нат}}} \quad \text{и} \quad q_2 = \frac{Q_2}{P_{\text{нат}}}.$$

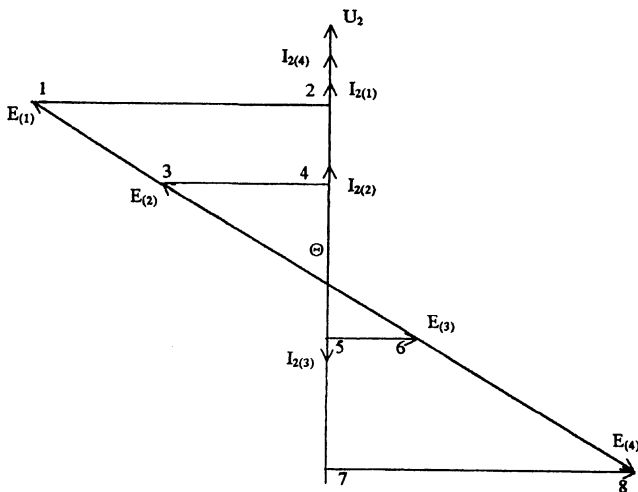


Рис. 4. ЭДС генераторов передающей станции при различной дальности передачи

Поэтому, как следует из (3) и (4), величина ЭДС E при повышении номинального напряжения и натуральной мощности уменьшается, а угол Θ — увеличивается. Следовательно, уровень устойчивости и пропускной способности электропередачи снизится. Для того чтобы реализовать эффект повышения номинального напряжения необходимо воздействовать на величину реактивной мощности в конце линии q_2 , что можно сделать за счет подключения к линии шунтирующих реакторов. Установка последних может быть необходима по условиям самовозбуждения генераторов.

Из изложенного следует, что в системах передачи, пропускная способность которых определяется условиями устойчивости, без компенсаторов реактивной мощности линии не обойтись. Причем чем больше

натуральная мощность линии электропередачи, тем большая мощность компенсаторов реактивной мощности потребуются. Особенно это актуально для новых линий повышенной натуральной мощности.

На устойчивость систем электропередач оказывают влияние режимы и свойства нагрузки. Для устойчивости узлов нагрузки, в которых преобладают асинхронные двигатели, имеют значение средства компенсации реактивной мощности. Существенное снижение устойчивости электрических систем получается при компенсации реактивной мощности асинхронных двигателей статическими конденсаторами, имеющими отрицательный регулирующий эффект, равный -2 .

Повышение устойчивости может быть достигнуто применением промышленными предприятиями не только асинхронных, но и синхронных двигателей, снабженных устройствами форсирования возбуждения. Отклонения от установившегося режима работы системы, изменения углов расхождения роторов сопровождаются также изменениями скорости вращения машин, частоты и величины ЭДС, токов. С частотой меняются реактивные сопротивления системы и мощности нагрузок. Влияние основных видов нагрузки приемной энергосистемы на пропускную способность электропередач по условиям устойчивости достаточно освещено [1, 4 – 6 и др.].

Представляет интерес влияние нагрузок, подключенных в промежуточных точках линии, в том числе и местной нагрузки. Благоприятное действие местной нагрузки обуславливается главным образом необходимостью увеличения установленной мощности генераторов передающей станции, что дает уменьшение действительной величины реактивного сопротивления генераторов и приводит к увеличению передаваемой мощности. Кроме того, положительное действие местной нагрузки в некоторой степени зависит от ее регулирующего эффекта. Обладая определенным индуктивным сопротивлением, местная нагрузка, подобно шунтирующему реактору, компенсирует в известной степени, емкостную проводимость линии.

Влияние местной нагрузки на динамическую устойчивость невелико, оно обусловлено тормозящим действием нагрузки на генераторы. Учет динамических характеристик нагрузок может оказать заметное влияние на окончательный результат расчета динамической устойчивости только в том случае, когда система находится на пределе устойчивости. Отсюда следует, что учет нагрузок динамическими характеристиками, так же как и само тормозящее действие местной нагрузки, имеет небольшое значение для динамической устойчивости систем электропередач [1].

Отмеченное влияние местной нагрузки на статическую и динамическую устойчивость системы в основном может быть отнесено и к случаю размещения нагрузки в промежуточных точках линии электропередач. Некоторое отличие обуславливается зависимостью регулирующего эффекта нагрузки от напряжения в точке ее присоединения и зависимостью взаимного сопротивления схемы замещения системы электропередачи от месторасположения нагрузки.

При наличии нагрузки в промежуточной точке линии необходимо различать коэффициент запаса статической устойчивости по мощности до отбора z_{1c} и после него z_{2c} :

$$z_{1c} = \frac{P_{1M} - P_{10}}{P_{10}}; \quad z_{2c} = \frac{P_{2M} - P_{20}}{P_{20}},$$

где P_{1M} – предельное значение мощности, передаваемой до отбора;

P_{10} – мощность, передаваемая по линии до отбора в нормальном режиме;

P_{2M} – предельное значение мощности, передаваемой после отбора;

P_{20} – мощность, передаваемая по линии после отбора в нормальном режиме.

В табл. 1 показано изменение z_{1c} и z_{2c} с перемещением нагрузки вдоль линии для системы электропередачи длиной 500 км с обычными параметрами при напряжении линии 330 кВ. Положение нагрузки определяется расстоянием l_1 от начала линии до точки присоединения к ней.

Таблица 1

l_1	0	100	200	300	400	500
z_{2c}	1,03	0,81	0,80	0,69	0,57	0,46
z_{1c}	0,25	0,21	0,19	0,19	0,18	0,19

Коэффициенты запаса статической устойчивости определялись по действительному пределу мощности с учетом регулирующего эффекта нагрузки. Отношение мощности, передаваемой после отбора, к мощности нагрузки было принято $P/P_H = 3$.

Из табл. 1 видно, что коэффициент запаса z_{2c} по мощности, передаваемой после отбора, существенно зависит от места присоединения нагрузки, а коэффициент запаса z_{1c} изменяется в небольших пределах.

Наибольшее значение коэффициента запаса z_{2c} по мощности, передаваемой после отбора, получается при включении нагрузки в начале линии. По мере удаления нагрузки от начала линии z_{2c} заметно уменьшается, достигая наименьшего значения при включении нагрузки в конце линии.

ВЫВОДЫ

1. Дальность электропередачи оказывает влияние на ЭДС генераторов. Это влияние характеризуется формулами (3) и (4).

Дальность воздействует на эквивалентное сопротивление генераторов: сопротивление генераторов при подсчете эквивалентного сопротивления системы передачи умножается на некоторый коэффициент, обусловленный свойствами линии передачи, равномерностью распределения ее параметров, и составляет вполне определенную величину для данной дальности передачи (например, выражение (1)).

2. Для электропередач напряжением выше 220 кВ, обладающих существенным емкостным эффектом, увеличения напряжения и натуральной мощности недостаточно для повышения пропускной способности; для реализации эффекта повышения напряжения необходимо применение компенсаторов реактивной мощности.

3. Рассмотрено влияние нагрузки на пропускную способность системы передачи. Зависимость этого влияния от места расположения нагрузки на линии характеризуется табл. 1.

ЛИТЕРАТУРА

1. П о с п е л о в Г. Е. Элементы технико-экономических расчетов систем электропередач. — Мн.: Выш. шк., 1967. — 311 с.

2. П о с п е л о в Г. Е. Влияние АРВ генераторов на особые точки ЛЭП // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). — 1998. — № 4. — С. 26—33.

3. Ф е д о р о в а И. А. О влиянии некоторых химических производств на статические характеристики узлов нагрузки энергетических систем // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений СССР). — 1964. — № 6. — С. 88—92.

4. Н а з а р е н к о в а Г. А. К вопросу теоретического и экспериментального определения статических характеристик нагрузки промышленных предприятий // Тр. Новосибирского электротехн. ин-та. — Новосибирск, 1951. — Т. 2.

5. П р и м е р ы анализа и расчетов режимов электропередач, имеющих автоматическое регулирование и управление / Под ред. В. А. Веникова. — М.: Высш. шк., 1967. — 206 с.

6. Г у р е в и ч Ю. Е., Л и б о в а Л. Е., Х а г а т р я н Э. А. Устойчивость нагрузки электрических систем. — М.: Энергоиздат, 1981. — 209 с.

Представлена кафедрой
электрических систем

Поступила 26.04.2000

