

УДК 621.315

## МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТЯЖЕННЫХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

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

*Белорусский национальный технический университет*

В современных энергосистемах протяженные электропередачи выполняют функции электронного транспорта энергии и мощности от удаленных источников, системообразующую, межсистемных и межрегиональных связей. Функции определяют структурное, схемное решение, параметры электропередачи. Эволюция функций в процессе развития энергосистем приводит к превращению электропередачи из однородной в неоднородную (промежуточные включения) или к росту степени неоднородности.

Волновая природа передачи электроэнергии и наличие неоднородности приводят к высокой сложности расчетов протяженных электропередач.

В [1] разработаны соотношения для определения потерь мощности, коэффициентов полезного действия протяженной электропередачи, позволяющие упростить расчеты. Задача настоящей статьи – показать универсальность этих соотношений, рост их значения и возможности многофункционального использования в современных условиях.

Для однородной линии электропередачи потери мощности определяются по формуле

$$\Delta P = 3 \int_0^L I^2 r_0 dl, \quad (1)$$

где  $I$  – ток, текущий в какой-либо точке линии на расстоянии  $l$  от конца линии,

$$\underline{I} = \underline{I}_2 \cosh \underline{\gamma} l + \frac{\underline{U}_2}{\underline{z}_B} \sinh \underline{\gamma} l; \quad (2)$$

$\underline{I}_2$ ,  $\underline{U}_2$  – ток и напряжение в конце электропередачи;  $r_0$  – активное сопротивление на 1 км линии;  $L$  – длина линии;  $\underline{\gamma}$  – коэффициент распространения волны;  $\underline{z}_B$  – волновое сопротивление линии.

После интегрирования (1) и преобразований получим выражения для вычисления потерь активной и реактивной мощностей однородной линии:

$$\Delta P = \frac{S_2^2}{U_2^2} R_{\text{л}} k_1 + \frac{P_{\text{нат}} R_{\text{л}}}{z_{\text{в}}} k_2 + \frac{P_2 z_{\text{в}} - Q_2 x_{\text{в}}}{z_{\text{в}}^2} R_{\text{л}} \beta L - \frac{Q_2 z_{\text{в}} - P_2 x_{\text{в}}}{z_{\text{в}}^2} R_{\text{л}} k_3; \quad (3)$$

$$\Delta Q = \frac{S_2^2}{U_2^2} x_{\text{л}} k_1 + \frac{P_{\text{нат}} x_{\text{л}}}{z_{\text{в}}} k_2 + \frac{P_2 z_{\text{в}} - Q_2 x_{\text{в}}}{z_{\text{в}}^2} x_{\text{л}} \beta L - \frac{Q_2 z_{\text{в}} - P_2 x_{\text{в}}}{z_{\text{в}}^2} x_{\text{л}} k_3. \quad (4)$$

Здесь

$$k_1 = 0,5 + \frac{\sin 2\alpha L}{4\alpha L}; \quad (5)$$

$$k_2 = 0,5 - \frac{\sin 2\alpha L}{4\alpha L}; \quad (6)$$

$$k_3 = \frac{1 - \cos 2\alpha L}{2\alpha L}; \quad (7)$$

$$R_{\text{л}} = r_0 L; \quad x_{\text{л}} = x_0 L.$$

При небольших расстояниях  $L$  можно допустить, что  $\sinh 2\beta L \approx 2\beta L$ ;  $\cosh 2\beta L \approx 1$ ;  $\sin 2\alpha L \approx 2\alpha L$ ;  $\cos 2\alpha L \approx 1$ , и тогда получим известные формулы, применяемые в расчетах электрических сетей и корректные при длинах линий до 300–500 км:

$$\Delta P = \frac{S_2^2}{U_2^2} R_{\text{л}}; \quad \Delta Q = \frac{S_2^2}{U_2^2} x_{\text{л}}.$$

Для электропередачи с промежуточными включениями необходимо переходить к представлению ее эквивалентным четырехполюсником с обобщенными постоянными:

$$\underline{A} = A' + jA''; \quad \underline{B} = B' + jB''; \quad \underline{C} = C' + jC''; \quad \underline{D} = D' + jD''.$$

Исходя из соотношений:

$$\Delta P = P_1 - P_2; \quad P_1 = \operatorname{Re}(\hat{U} \underline{I}_1) \quad \text{и} \quad \underline{U}_1 = \underline{A} \underline{U}_2 + \underline{B} \underline{I}_2; \quad \underline{I}_1 = \underline{C} \underline{U}_2 + \underline{D} \underline{I}_2,$$

в [1] получено универсальное выражение для расчета потерь активной мощности

$$\Delta P = (A'C' + A''C'')U_2^2 + (B'D' + B''D'')I_2^2 + 2(A''D'' + B'C')P_2 + 2(A''D'' + B'C'')Q_2. \quad (8)$$

На основе (8) выведены соотношения для оценки энергоэффективности электропередачи для расчета:

– значения КПД:

$$\eta = \frac{P_2}{k_4 U_2^2 + k_5 I_2^2 + k_6 P_2 + 2k_7 Q_2}; \quad (9)$$

– значения максимального КПД – наибольшего КПД при изменении нагрузки в достаточно широких пределах и неизменном напряжении одного из концов линии

$$\eta_m = \frac{1}{2\sqrt{a-b+d}}, \quad (10)$$

где

$$k_4 = A'C' + A''C''; \quad k_5 = B'D' + B''D''; \quad k_6 = d = 2A''D'' + 2B'C' + 1;$$

$$k_7 = C'B'' - A''D'; \quad a = (A'C' + A''C'')(B'D' + B''D''); \quad b = (B'C' - A''D'').$$

Активная и реактивная мощности нагрузки электропередачи, соответствующие максимальному КПД, определяются:

$$P_{2\eta m} = \sqrt{\frac{k_4}{k_5} - \left(\frac{b}{k_5}\right)^2}; \quad Q_{2\eta m} = \frac{b}{k_5}. \quad (11)$$

Расчетные соотношения (8)–(11) при всей своей простоте учитывают особенности режимов и параметров электропередач с пассивными и активными промежуточными элементами. Эти соотношения являются многофункциональными, так как, во-первых, их правые части включают в себя параметры, являющиеся функциями многих переменных, и, во-вторых, расчеты с их использованием могут иметь различные области применения.

Соотношения (8)–(11) позволяют учесть:

волновую природу протяженных линий;

изменения перетоков активной и реактивной мощностей;

все виды потерь, включая потери на корону;

изменение нагрузок электропередачи (на конце линии и промежуточных)

во времени  $P_{\text{нагр},i} = f(t)$ ;

пассивные и регулируемые устройства компенсации электропередачи.

Способ учета нагрузок и регулируемых устройств компенсации предложен и описан в [2]. Он предусматривает эквивалентирование электропередачи на основе теории сигнальных графов. Сложнее учесть активные промежуточные включения (источники энергии или устройства группы FACTS). Однако и это осуществимо при использовании подходов и алгоритма, предложенного в [2].

Рассмотрим области применения соотношений (8)–(11).

Они могут быть полезны при оценочных расчетах в процессе планирования схем и режимов энергосистем. Необходимы при выполнении технико-экономических обоснований строительства и конкретном проектировании электропередач для оценки потерь мощности, энергоэффективности, рекомендации мер по снижению потерь.

Следующей сферой применения рассматриваемых соотношений являются расчеты по определению цен и тарифов на электроэнергетическом оптовом рынке. Соотношения (3) и (8) позволяют объективно и обоснованно учесть в стоимости услуг по транспортировке электроэнергии составляющую потерь мощности и энергии в протяженных электропередачах и включить ее в тарифы.

Речь, прежде всего, идет о контрактных рынках, основанных на прямых двусторонних соглашениях о физических поставках электроэнергии различной срочности, а также на торговле стандартизированными контрактами на биржах. Так, на долгосрочном рынке двусторонних договоров стороны фиксируют цены и объемы поставок и несут обязательства по оплате потерь. Отметим, что рынок свободных двусторонних договоров может рассматриваться как основной, так как на него приходится до 80 % оборота электроэнергии оптового рынка. Стандартизированные контракты непосредственно не связаны с физическими поставками электроэнергии, а являются финансовыми инструментами. В них также требуется учитывать стоимостное выражение потерь, полученное расчетным путем. Особенную значимость для взаиморасчетов имеет объективная оценка потерь для электропередач, осуществляющих межгосударственные и межрегиональные связи.

Соотношения (3) и (8) могут использоваться в алгоритмах ценообразования на рынках «на сутки вперед» (спотовых) для учета потерь при передаче электроэнергии. При этом рассчитываемые значения эквивалентных обобщенных постоянных электропередачи необходимы также для расчетов ограничений по передаваемой мощности. Применение метода узловой цены требует определения ограничений по пропускной способности электрических сетей и потерь электроэнергии при передаче между точками поставок производителей и присоединения потребителей. Как указано в [3], узловое ценообразование обеспечивает физическую реализуемость поставок и адекватные ценовые сигналы для инвестиций в развитие сетевого комплекса, включая линии электропередачи.

Актуальной областью использования соотношений (3)–(11) является учебный процесс. Относительная простота соотношений, возможность построения на их основе алгоритмов для исследования, анализа и подбора схем и энергоэффективных параметров и режимов электропередач позволяют применять их при выполнении студентами курсовых и дипломных проектов.

#### ВЫВОД

Разработанные в [1] соотношения (3)–(11) имеют универсальный характер для однородных и неоднородных электропередач с промежуточными включениями пассивного и активного характера. Они являются многофункциональными в части учета как физических явлений и взаимовлияния параметров и режимов электропередач, так и сфер применения: выполнение ТЭО, проектирование, ценообразование на оптовом рынке, учебный процесс.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. П о с п е л о в, Г. Е. Элементы технико-экономических расчетов систем электропередач / Г. Е. Поспелов. – Минск: Вышэйш. шк., 1967. – 312 с.
2. 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. – 174 с.
3. Г и т е л ь м а н, Л. Д. Энергетический бизнес: учеб. / Л. Д. Гительман, Б. Е. Ратников. – М.: Изд-во «Дело» АНХ, 2008. – 416 с.

Представлена кафедрой  
электроснабжения  
УДК 621.316.99

Поступила 06.12.2011