

## **ЧЕТЫРЕХФАЗНАЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧА В СХЕМЕ ВЫДАЧИ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

**Асп. КУЗЬМИЧ С. В.**

*Белорусский национальный технический университет*

Современное состояние энергетики в промышленно развитых странах характеризуется:

- продолжающимся ростом нагрузок, вызванным развитием экономики этих стран;
- большой плотностью электрических сетей различных напряжений;
- повышенными экологическими требованиями, вызывающими сложности в сооружении новых линий электропередачи;
- объединением электрических сетей различных компаний в единые национальные энергосистемы и стремлением к объединению электроэнергетических систем государств.

В условиях СНГ существуют свои особенности развития электроэнергетических систем, хотя можно отметить и некоторые их общие закономерности.

Схемы выдачи мощности электростанций развивались одновременно со становлением электроэнергетики. Еще накануне первой мировой войны электроэнергетики провели технико-экономические исследования, показавшие не только преимущества объединения мелких электростанций, которые тогда в основном строились, но и выгоду сооружения крупных электростанций для передачи электроэнергии на расстояние [1].

В России в 1915 г. в 70 км от Москвы была построена электростанция для передачи энергии в столицу по воздушной линии напряжением 70 кВ. В 1922 г. начала функционировать первая очередь Каширской ГРЭС с первой воздушной линией электропередачи 110 кВ до Москвы, в 1925 г. пущена в эксплуатацию первая очередь Шатурской ГРЭС с двухцепной воздушной линией 110 кВ Шатурская ГРЭС – Москва. С созданием в 1933 г. Нижнесвирской ГЭС вводится в действие первая в СССР линия 220 кВ Свирь – Ленинград длиной 240 км. Далее строительство электростанций и схем выдачи их мощности идет планомерно вплоть до напряжений воздушных линий переменного тока 1150 кВ и линий постоянного тока 1500 кВ ( $\pm 750$  кВ) [1, 2]. В 1950 г. была введена в эксплуатацию первая опытно-промышленная передача постоянного тока (ППТ) Кашира – Москва, в 1962 г. – ППТ напряжением 800 кВ ( $\pm 400$  кВ) Волгоград – Донбасс.

В связи с особенностями размещения энергетических ресурсов и потребителей в настоящее время наблюдается тенденция создания крупных электростанций в восточных районах СНГ и транспорта электроэнергии в западные страны и дефицитные по энергии районы.

Рассмотрим два случая электропередачи в схемах выдачи мощности электростанций, осуществляющих экспорт электроэнергии.

Большинство электростанций выдает мощность на двух (220 и 500 кВ или 330 и 750 кВ) либо одном высоком или сверхвысоком напряжении [2]. Отмечается резкое увеличение количества электростанций, выдающих мощность на одном напряжении по электропередаче высокой пропускной способности. Представляется важным при разработке схем выдачи мощности в числе вариантов рассматривать возможность и целесообразность использования четырехфазной линии электропередачи [3, 4], обладающей высокой пропускной способностью и надежностью.

Четырехфазная линия, принципиальная схема которой представлена на рис. 1, подключена через выключатели к фазообразующим трансформаторам. Для преобразования трехфазного тока в четырехфазный и обратно может быть использована схема Скотта [5]. Два фазообразующих трансформатора (рис. 1) преобразуют трехфазную систему ( $a, b, c$ ) в две двухфазные системы ( $\alpha, \beta$ ) и ( $\bar{\alpha}, \bar{\beta}$ ), которые образуют четырехфазную симметричную уравновешенную систему с фазовым сдвигом  $90^\circ$ . Соответствующая векторная диаграмма напряжений и вариант подвески проводов представлены на рис. 2.

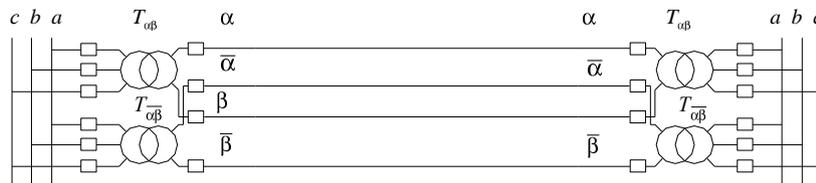


Рис. 1. Схема четырехфазной электропередачи

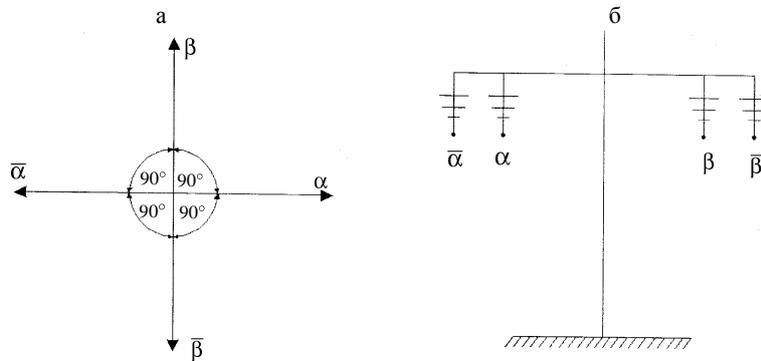


Рис. 2. Четырехфазная электропередача: а – векторная диаграмма напряжений; б – вариант подвески проводов

Электропередачи, предназначенные для выдачи мощности крупных электростанций, должны иметь достаточный уровень надежности. Применение двухцепных электропередач трехфазного тока является традиционным решением этой проблемы. При обеспечении требуемого уровня надежности электропередач высокого и сверхвысокого напряжений следует иметь в виду, что подавляющее число повреждений – однофазные. По экономическим и экологическим соображениям выбор делается в пользу одноцепной электропередачи. Для повышения надежности может быть использована резервная фаза воздушной линии передачи. В нормальном

режиме она отключена, а в аварийном режиме – подключается вместо отключаемой аварийной фазы.

Четырехфазная электропередача имеет такой же уровень надежности, как и двухцепная трехфазная электропередача, но у нее лучшие технико-экономические показатели. Неустойчивые однофазные короткие замыкания ликвидируются за счет автоматического повторного включения. В случае устойчивого однофазного повреждения четырехфазная электропередача переводится в трехфазный режим. Для этой цели на фазообразующих трансформаторах предусматриваются вспомогательные устройства. Благодаря этому переходу в симметричный трехфазный режим может быть передано 75 % номинальной мощности четырехфазной электропередачи. За счет такой возможности четырехфазная электропередача соответствует уровню надежности двухцепной трехфазной электропередачи с резервной фазой.

Фазы четырехфазной линии передачи размещаются на опорах таким образом (рис. 2б), что образуют две независимые симметричные двухфазные системы, в каждой из которых напряжения находятся в противофазе. Это приводит к увеличению натуральной мощности линии передачи и снижению негативного экологического влияния на окружающую среду. Согласно [3] натуральная мощность четырехфазной линии в 1,5–2 раза больше, чем у одноцепной трехфазной; максимальная напряженность под четырехфазной линией составит около 35–50 % максимальной напряженности под линией трехфазного тока.

Для сравнения рассматриваемой электропередачи с альтернативными вариантами обратимся к основному технико-экономическому показателю – стоимости передачи электроэнергии по линии [6, 7]

$$\tilde{n}_i = \frac{\alpha k_1 l \chi}{P T_M} + \frac{\Delta P \tau \beta}{P T_M}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – ежегодные отчисления от капитальных затрат, доли;  $k_1$  – стоимость 1 км линии, тыс. руб;  $P$  – передаваемая мощность в максимальном режиме, МВт;  $T_M$  – число часов использования максимума нагрузки, ч;  $l$  – дальность передачи, км;  $\chi$  – кратность, на которую надо умножить реальные километры протяженности линии для учета экологического фактора согласно искусственной шкале;  $\Delta P$  – потери мощности в линии в максимальном режиме, МВт;  $\tau$  – время максимальных потерь, ч;  $\beta$  – стоимость 1 кВт·ч потерь энергии, руб/(кВт·ч).

Выразим составляющие формулы (1) через КПД линии передачи  $\eta$ :

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{1-\eta}{\eta} = \frac{P r_0 l}{U^2 \cos^2 \varphi}; \quad (2)$$

$$P = \frac{U^2 \cos^2 \varphi (1-\eta)}{r_0 l},$$

где  $r_0$  – удельное сопротивление линии на 1 км, Ом;  $U$  – напряжение для четырехфазной линии между полюсами  $\alpha$  и  $\bar{\alpha}$ , а для трехфазной – линейное, кВ.

Подставив эти значения в формулу (1), получим:

$$c = \beta \frac{\tau}{T_M} \left( \frac{l^2}{l_k^2} \frac{\eta}{1-\eta} + \frac{1-\eta}{\eta} \right) \quad (3)$$

или

$$\frac{c}{\beta} = \frac{\tau}{T_M} \left( \frac{l^2}{l_k^2} \frac{\eta}{1-\eta} + \frac{1-\eta}{\eta} \right) \quad (4)$$

где

$$l_k = U \cos \varphi \sqrt{\frac{\tau \beta}{\alpha k_1 \chi r_0}}. \quad (5)$$

Здесь величина  $l_k$  – критериальная длина, которая имеет размерность длины.

Исследование выражения (4) показывает, что зависимость стоимости передачи электроэнергии от КПД линии передачи имеет четко выраженный минимум при некотором значении КПД, которое названо экономическим. Для определения минимальной стоимости передачи электроэнергии воспользуемся производной  $\frac{dc}{d\eta_k}$  по выражению (4). Приравняв ее к нулю, получим уравнение для определения экономического коэффициента полезного действия ЛЭП, соответствующего минимальной стоимости передачи электроэнергии:

$$\frac{l}{l_k} = \frac{1-\eta_3}{\eta_3}. \quad (6)$$

Отсюда находим экономический КПД

$$\eta_3 = \frac{l_k}{1+l_k}. \quad (7)$$

Подставим  $\eta_3$  в выражение (4) и получим формулу для определения минимальной стоимости передачи электроэнергии

$$c_M = 2\beta \frac{\tau}{T_M} \frac{l}{l_k}, \quad (8)$$

или в долях от стоимости потерь  $\beta$

$$\frac{c_M}{\beta} = 2 \frac{\tau}{T_M} \frac{l}{l_k}. \quad (9)$$

Из (6) видно, что критериальная длина равна длине линии, у которой  $\eta_3 = 0,5$ , а также, что протяженности рассматриваемой линии соответствуют в правой части потери в линии, а критериальной длине – полезная мощ-

ность. Поэтому  $l_k$  можно рассматривать как длину линии с теми же параметрами, что и рассматриваемая, в которой выделяется в виде потерь мощность, равная полезной.

Подставляя  $\eta_3$  в выражение (2), найдем экономическую мощность

$$P_3 = \frac{U^2 \cos \varphi}{r_0 l} \frac{1 - \eta_3}{\eta_3}, \quad (10)$$

или

$$P_3 = \frac{U^2 \cos^2 \varphi}{r_0 l_k} = U \cos \varphi \sqrt{\frac{\alpha k_1 \chi}{\beta \tau r_0}}. \quad (11)$$

Экономическая плотность тока  $j_{33}$ , соответствующая экономическому КПД линии трехфазного тока, определяется с помощью формулы

$$F_3 = \frac{U^2 \cos^2 \varphi}{r_0 l} \frac{1 - \eta_3}{\eta_3} = \sqrt{3} U j_{33} F \cos \varphi \cdot 10^3,$$

где  $F$  – сечение провода.

Откуда находим

$$j_3 = \frac{1 - \eta_3}{\eta_3} \frac{U \cos \varphi}{\sqrt{3} r_0 l F} \cdot 10^3,$$

или

$$j_3 = \frac{10^3}{F} \sqrt{\frac{\alpha k_1 \chi}{3 \tau \beta r_0}}. \quad (12)$$

Аналогично для линии передачи четырехфазного тока

$$P_3 = \frac{U^2 \cos^2 \varphi}{r_0 l} \frac{1 - \eta_3}{\eta_3} = 2 U j_{34} F \cos \varphi \cdot 10^3.$$

Откуда находим

$$j_{34} = \frac{1 - \eta_3}{\eta_3} \frac{U \cos \varphi}{2 r_0 l F} \cdot 10^3, \quad (13)$$

или

$$j_{34} = \frac{10^3}{2F} \sqrt{\frac{\alpha k_1 \chi}{\tau \beta r_0}}. \quad (14)$$

Сравнение (12) и (14) показывает, что экономическая плотность тока для четырехфазной линии отличается от экономической плотности тока трехфазной линии. Если допустить, что, кроме  $k_1$ , все остальные параметры в обоих вариантах одинаковы, то получим

$$\frac{j_{34}}{j_{33}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{\frac{k_{14}}{k_{13}}}.$$

Согласно [3]  $k_{14} < k_{13}$  на 15–20 %, тогда

$$j_{34} = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{0,83} j_{33} = 0,865 \cdot 0,91 j_{33} = 0,8 j_{33}.$$

Таким образом, для указанного соотношения стоимостей линии четырех- и трехфазного токов экономическая плотность для четырехфазного тока составляет примерно 0,8 экономической плотности трехфазного тока. Определение экономической плотности тока по формулам (12) и (14) для трех- и четырехфазного токов позволяет учитывать дискретность шкалы стандартных сечений проводов, конкретную экономическую конъюнктуру и экологию района.

Подстанции четырехфазного тока будут дороже подстанций трехфазного тока за счет фазорегулирующих трансформаторов на 10–20 % [4].

Для оценки четырехфазной электропередачи на основе соотношений (7), (9) рассчитаны и на рис. 3 построены зависимости минимальной стоимости передачи электроэнергии  $c_M$  и экономического КПД  $\eta_3$  от дальности для четырехфазной электропередачи (пунктирные линии) и для трехфазной (сплошные линии), где  $U = 750$  кВ; провод  $5 \times \text{АС-400}$ ;  $T_M = 6000$  ч;  $\tau = 4600$  ч;  $\alpha = 0,14$ ;  $k_1$  – по табл. 9.7 и 9.8 [2];  $\beta = 0,03$  руб/(кВт·ч).

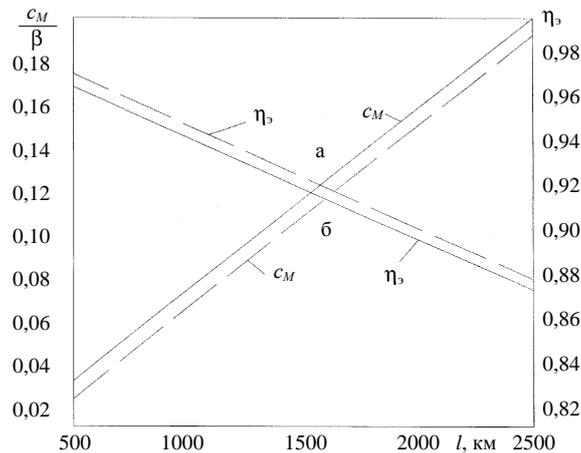


Рис. 3. Зависимости минимальной стоимости передачи электроэнергии  $c_M$  и экономического КПД  $\eta_3$  для: а – четырехфазной; б – трехфазной электропередачи

Минимальная стоимость передачи электроэнергии отложена на оси ординат в долях от стоимости потерь электроэнергии. Из рис. 3 следует, что минимальная стоимость передачи электроэнергии для четырехфазной электропередачи несколько меньше, чем для трехфазной, а экономический КПД для четырехфазной электропередачи превосходит аналогичный показатель трехфазной электропередачи.

Отметим еще некоторые преимущества четырехфазной электропередачи. Как уже указывалось, согласно [4] натуральная мощность четырехфазной электропередачи в 1,5–2 раза больше одноцепной трехфазного переменного тока.

Снижение напряженности электрического поля под четырехфазной воздушной линией по сравнению с трехфазной составляет 35–50 %.

Четырехфазные электропередачи следует рекомендовать при выборе схемы выдачи мощности крупных электростанций среди других альтернативных вариантов. Наибольший эффект [4] дает выбор четырехфазной электропередачи вместо передачи постоянного тока, так как четырехфазная воздушная электропередача примерно в том же соотношении, как и воздушная ППТ, экономичнее трехфазной воздушной линии при равных передаваемых мощностях. Удорожание подстанции постоянного тока по сравнению с подстанцией трехфазного тока окажется значительнее, чем для подстанции четырехфазной ЛЭП.

## ВЫВОДЫ

1. Четырехфазная электропередача конкурентоспособна с трехфазной электропередачей. Она имеет лучшие технологические показатели (минимальную стоимость передачи электроэнергии и экономический КПД), чем одноцепная трехфазная электропередача с резервной фазой.

2. Четырехфазная электропередача может быть использована в схеме выдачи мощности электростанции.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Некрасов, А. М. От мелких изолированных электростанций до Единой энергетической системы Европейской части СССР / А. М. Некрасов, Г. В. Сербиновский // Дальние электропередачи 750 кВ. – Ч. 1: Воздушные линии. – М.: Энергия, 1974. – С. 7–11.
2. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / В. В. Ершевич [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 325 с.
3. Самородов, Г. И. Электропередача переменного тока: а. с. 1700682 СССР / Г. И. Самородов // Бюл. изобр. – 1991. – № 47.
4. Самородов, Г. И. Четырехфазная линия электропередачи / Г. И. Самородов // Изв. РАН. Энергетика. – 1995. – № 6. – С. 3–11.
5. Ворфоломеев, Г. И. Схема Скотта: история и перспективы. Совершенствования (к 100-летию создания) / Г. И. Ворфоломеев // Электричество. – 1994. – № 10. – С. 74–77.
6. Пospelov, Г. Е. Почем передача одного киловатт-часа переменным и постоянным током? / Г. Е. Пospelov, С. В. Кузьмич // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: сб. тр. II Всерос. НТК. – Благовещенск: МОРФ, 2000. – С. 155–157.
7. Пospelov, Г. Е. Элементы технико-экономических расчетов систем электропередач / Г. Е. Пospelov. – Минск: Вышэйш. шк., 1967. – С. 307.

Представлена кафедрой  
электрических станций

Поступила 7.07.2006