

О ПРОЦЕССАХ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И СХЕМАХ ЗАМЕЩЕНИЯ ЛЭП*

Канд. техн. наук, проф. РАХИМОВ К. Р.

Кыргызский технический университет

В [1] все расчеты излагаются, исходя из теории передачи электроэнергии по проводам за счет электронной проводимости с использованием законов Ома, Кирхгофа и др.

В отдельной главе, посвященной длинным сверхвысоковольтным линиям, передача электроэнергии принята электромагнитными волнами.

Остается открытым вопрос, в каких случаях имеет место передача электроэнергии токами проводимости, а когда – токами смещения (передача электромагнитными волнами), не объясняются причины перехода передачи электроэнергии токами проводимости к передаче токами смещения на линиях сверхвысокого напряжения, не раскрываются вопросы зависимости вида электропередачи от частоты и т. д.

Согласно квантово-механической теории электропроводности металлов, скорость передачи электрической энергии зависит от средней скорости мигрирующих электронов, а электропроводность – от подвижности и плотности свободных электронов, от длины свободного пробега электрона [2].

Сила тока проводимости $i(J)$ определяется плотностью тока j , которая связана с напряженностью E законом Ома:

$$j = \gamma E, \quad (1)$$

где γ – удельная электропроводность материала проводника, равная

$$\gamma = \frac{ne^2\tau}{2m}. \quad (2)$$

С другой стороны,

$$j = nev, \quad (3)$$

где n – концентрация электронов; e – заряд; v – средняя скорость упорядоченного движения электронов, которая равна

$$v = \frac{eE}{2m}\tau; \quad (4)$$

τ – среднее время свободного пробега электронов; m – масса носителя заряда.

* Публикуется в порядке обсуждения. – *Ред.*

Плотность тока определяется из выражения

$$j = \frac{ne^2\tau}{2m} E. \quad (5)$$

Поскольку скорость передачи электрической энергии по металлу зависит от скорости мигрирующих электронов, которая равна $V = 1000$ км/с, скорость передачи электрической энергии по проводам равна скорости движения электронов.

Длина волны в таком случае составит

$$\lambda = TV = 0,02 \cdot 1000 = 20 \text{ км},$$

где T – период при частоте $f = 50$ Гц, равный $0,02$ с.

Согласно [3], существуют два различных процесса передачи электрической энергии: с помощью токов проводимости и токов смещения (электромагнитных волн). Если скорость изменения полей мала (малые частоты), то токами смещения можно пренебречь по сравнению с токами проводимости, и последние играют основную роль. В этом случае электрические явления существенно зависят от сопротивления линии и, следовательно, от свойств материала проводов. Если же поля изменяются быстро (большие частоты), то главную роль играют токи смещения, и электрические явления определяются электромагнитными волнами. При этом основные процессы происходят между проводами в окружающей среде, электрические явления практически не зависят от свойств материала проводов.

Скорость передачи электромагнитными волнами принимается равной скорости света $C = 300 \cdot 10^3$ км/с.

Длина волны при этом будет равна

$$\lambda = 0,02 \cdot 300 \cdot 10^3 = 6000 \text{ км}.$$

Переменный ток частотой 50 Гц относится к токам низких частот, поэтому передача электрической энергии переменным током осуществляется, в основном, токами проводимости. Отметим, что способы разграничения двух процессов передачи электрической энергии в зависимости от частоты в литературе не приводятся. В линиях связи (телефон, телеграф, радио, телевидение), где применяются высокие частоты, сечение провода и материал не играют существенной роли, так как передача электрической энергии осуществляется распространением электромагнитных волн вдоль проводов линии.

Такая передача, согласно основному положению теории Максвелла, осуществляется следующим образом. Электромагнитная волна распространяется вдоль линии путем превращения электрического поля в магнитное и обратного превращения в электрическое. Передача электромагнитной волны, не связанная с электронной проводимостью проводника, подчиняется всем закономерностям передачи волн [3].

Проанализируем изменения параметров, характеристик линии с ростом напряжения и протяженности для выявления причин, по которым передача энергии токами проводимости переходит к токам смещения.

С ростом дальности линии повышаются ее суммарное активное и индуктивное сопротивление, емкостная проводимость, соответственно индуктивная и емкостная мощности пропорционально ее длине, которые не могут резко изменить процесс передачи энергии, так как все зависимости являются линейными.

С ростом напряжения сильно увеличивается емкостная мощность – пропорционально квадрату напряжения. Ее доля относительно натуральной мощности линии в зависимости от напряжения не изменяется и составляет примерно 10 % на 100 км длины линии.

Именно из-за увеличения токов смещения (емкостных токов) распространена точка зрения, что на сверхвысоковольтных линиях вся энергия передается электромагнитными волнами. Но их доля в электропередаче незначительна. Однако с ростом напряжения и протяженности линии увеличивается и доля передачи электромагнитными волнами.

В зависимости от частоты рост доли передачи энергии электромагнитными волнами значителен, так как емкостная проводимость

$$b_0 = \omega C_0$$

прямо пропорциональна частоте ($\omega = 2\pi f$).

В линиях связи, где применяются частоты в тысячи и сотни тысяч раз большие, чем в линиях электропередачи, несомненно, основная роль передачи энергии принадлежит электромагнитным волнам.

Таким образом, в передаче переменного тока имеют место оба процесса передачи электрической энергии.

Опыт проектирования ЛЭП (выбор сечения проводов, расчет и выбор трансформаторов и т. д.), а также расчеты параметров (потери мощности, энергии, напряжения и т. д.) показывают, что передача электрической мощности частотой 50 Гц в основном осуществляется электронной проводимостью проводов. За счет второго способа передачи электрической энергии устанавливается электрическое поле (поле смещения). Электромагнитными волнами может быть передана какая-то небольшая часть активной мощности при такой низкой частоте, которая применяется в передачах переменного тока.

Подтверждением передачи энергии электронной проводимостью проводов является факт определения индуктивной и натуральной мощностей на линии, исходя из факта протекания тока по проводнику.

Бытует мнение, что закономерности электропередачи по длинным линиям, протяженность которых превышает длину волны передаваемых электромагнитных колебаний, отличаются от закономерностей передач по коротким линиям. Однако закономерности передачи энергии токами проводимости не могут зависеть от длины ЛЭП.

В однородной линии параметры одинаковы по всей длине, и нет причин для изменения физики явления электропередачи при увеличении длины линии, хотя при этом растут токи смещения и емкость.

При передаче электроэнергии электронной проводимостью длина волны укладывается на длине линии примерно 20 км. При такой длине волны

все линии переменного тока будут отвечать определению длинной линии. Таким образом, деление на короткие и длинные линии не имеет основания.

При передаче энергии на высоких частотах в линиях связи, где она в основном передается электромагнитными волнами, можно различать передачу короткими и длинными линиями, в отличие от передачи переменным током.

Схемы замещения ЛЭП должны отличаться от схем замещения линий связи, соответственно и формулы расчетов распределения напряжения и тока вдоль линии.

Используются различные схемы замещения линий. В [1] приведены: кабельная линия $U_n \leq 10$ кВ представлена только активным сопротивлением, воздушная линия $U_n \leq 35$ кВ – активным и индуктивным, воздушная линия 110...330 кВ – активным и индуктивным сопротивлением и емкостной проводимостью (рис. 1а), иногда вместо емкостной проводимости учитывается реактивная мощность, генерируемая емкостью линии (рис. 1б). В этих схемах замещения реактивная проводимость и реактивная мощность приняты сконцентрированными и приложенными: одна половина – в начале и другая – в конце линии.

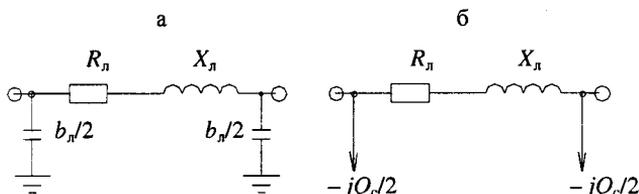


Рис. 1

Для линий сверхвысокого напряжения $U_n \geq 330$ кВ при длине более 300...400 км для определения параметров П-образной схемы замещения предлагается учитывать равномерное распределение сопротивлений и проводимостей вдоль линии (рис. 2).

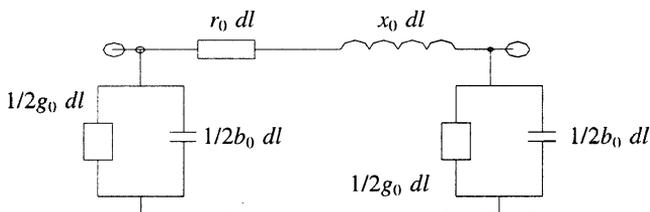


Рис. 2

Расчеты по выражениям, полученным по схеме замещения четырехполюсником (рис. 2), дают значения, хорошо совпадающие с данными, измеренными в высокочастотных системах. В высокочастотных линиях связи параметры сильно меняются вдоль линии, изменяясь от нулевого значения до максимума и обратно. Имеют место так называемые пучности напряжения и тока ввиду передачи энергии электромагнитными волнами.

Расчеты по схемам замещения (рис. 2) для ЛЭП дают результаты, резко отличающиеся от расчетных данных по схеме замещения (рис. 1). Причина в том, что в передаче переменного тока весьма незначительны поперечные активная и емкостная проводимости и почти нет фазовых сдвигов и затухания ввиду очень большой длины электромагнитной волны и ее малого участия в передаче энергии. На длине линии вмещается только некоторая доля длины волны.

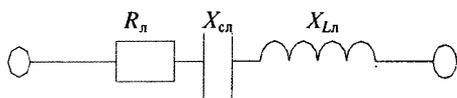


Рис. 3

Нами предлагается для составления схемы замещения ЛЭП принимать емкость линии как последовательно включенный элемент (рис. 3). Обоснованием такого мнения является физика процесса резонанса на линии, который представ-

ляет собой резонанс напряжений. Момент резонанса соответствует режиму равенства нагрузки линии натуральному значению ($S = S_{\text{нат}}$), при котором емкостная и индуктивная мощности равны ($Q_C = Q_L$).

В режиме резонанса на линии имеет место минимум потери напряжения (только на активном сопротивлении), потери напряжения на емкостном и индуктивном сопротивлении равны и взаимно компенсируются.

Согласно законам электротехники, такой режим характерен для последовательной схемы (рис. 3).

При рассмотрении баланса реактивных мощностей способ включения источников реактивных мощностей (конденсаторов или других компенсирующих устройств) не имеет значения: параллельно или последовательно. Линия, генерирующая реактивные мощности, может быть представлена как последовательно включенные емкостные и индуктивные источники. В схемах замещения (рис. 4а, б) представлены суммированные результаты реактивных сопротивлений.

Как было рассмотрено выше, линия сильно меняет свои свойства в зависимости от нагрузки. При $P < P_{\text{нат}}$ в линии преобладает емкостная мощность, ей соответствует емкостное сопротивление, и линия может быть замещена схемой (рис. 4а).

При равенстве $P = P_{\text{нат}}$ схема замещения будет состоять только из активного сопротивления (рис. 4б).

При нагрузке, больше натуральной $P > P_{\text{нат}}$, в линии преобладает индуктивная мощность, ей соответствует индуктивное сопротивление X_L и схема замещения будет выглядеть, как на рис. 4в.

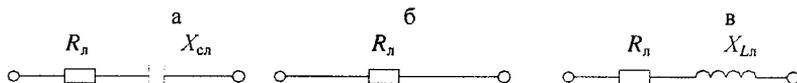


Рис. 4

ЛИТЕРАТУРА

- Идельчик В. И. Электрические системы и сети. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
- Тиходев Н. Н. Передача электроэнергии сегодня и завтра. – Л.: Энергия, 1975.
- Калашников С. Г. Электричество. – М.: Наука, 1985.

Представлена кафедрой
электроэнергетики

Поступила 6.12.2000