

## ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ИМПУЛЬСАМИ

Чашко М.В.

Донецкий национальный технический университет

lav@ltf.dgtu.donetsk.ua

The work is devoted to transfer of energy by an electric current changed in time is impulse. The purpose of the article - to present technology of transfer of energy reducing losses in a transmission line.

Работа посвящена технологии передачи электрической энергии, позволяющей снизить расход энергии в линиях передачи.

Актуальность проблемы обусловлена большими потерями энергии при ее передаче. Согласно отчету Минтопэнерго Украины технические потери электроэнергии в электрических сетях в 2003 г. составили 23 млрд. кВт·ч, или 14% энергии, отпущенной в сеть [1]. Стоимость потерянной энергии около 3 млрд. грн. Это в несколько раз выше, чем в других странах мира (например, в Германии потери энергии составляют 4,3%, в Италии – 6,6%).

Известные технологии передачи энергии основаны на аналоговых, непрерывных процессах. Предложенная и исследованная в работе технология предполагает передачу энергии импульсами. Как установлено в работе, существует условие, при котором передача импульсами обеспечивает при той же переданной мощности меньшие потери в линии, чем аналоговая передача.

**Состояние вопроса.** В общем случае линия обладает активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью. Для передачи энергии линия подключена к напряжению, по ней проходит ток, при этом от источника исходит энергия. В сопротивлении нагрузки энергия электрическая преобразовывается в другой вид (тепловую, механическую и др.). В линии энергия рассеивается в виде тепловой, запасается в магнитном и электрическом поле линии, причем в магнитном поле энергии запасается на несколько порядков больше, чем в электрическом.

В передачах переменного тока эта энергия в течение полупериода возвращается в источник и поступает в линию в течение следующего полупериода. Вследствие этого пользователю передается в каждый полупериод на  $0,5T$  меньше энергии, то есть пропускная способность линии меньше возможной по экономической плотности тока.

Известные способы решения проблемы энергии магнитного поля линии в передачах переменного тока заключаются в установке компенсирующих устройств в виде конденсаторных батарей или реакторов, в которых может быть запасена эта энергия [2]. При этом устраняется ее возврат в источник, но не исключается ее циркуляция по линии и потери в линии энергии. В передачах постоянного тока энергия магнитного поля линии создает проблему коммутации: за короткое время разрыва контактов эта энергия должна выделиться в дуге, так как, в отличие от передачи переменного тока, при постоянном отсутствуют естественные переходы тока через нуль.

Технология, исследуемая в данной работе, отличается тем, что энергия магнитного поля линии используется потребителем, а не возвращается в источник или компенсатор и не создает проблемы коммутации. Сущность технологии заключается в том, что процесс передачи энергии по линии и передачи ее потребителю разделены во времени. Это обеспечивает режим передачи, при котором энергия магнитного поля линии поступает потребителю, а не циркулирует по линии и не рассеивается при коммутации. Разделение во времени возможно, если энергию передавать импульсами. Отличие импульсного напряжения, тока, мощности от непрерывного, аналогового в том, что при импульсном имеется пауза. Импульсный способ дает возможность оптимизировать каждый этап передачи энергии независимо от другого. Пример импульсного процесса представлен на рис. 1.

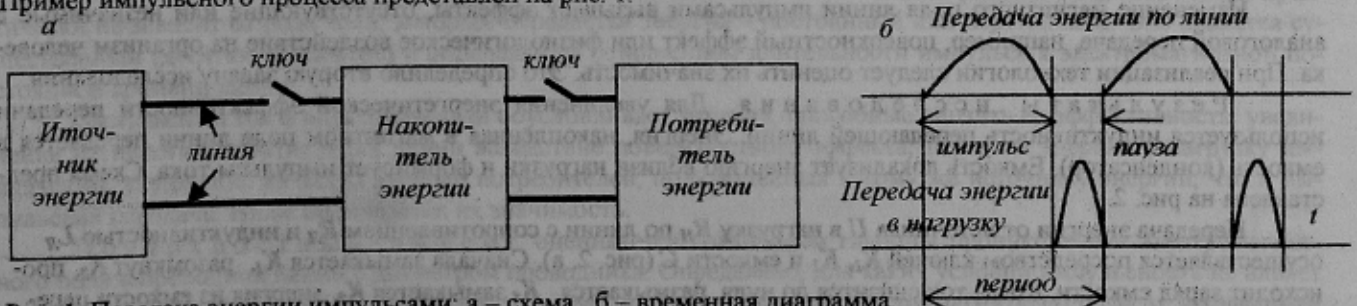


Рис. 1. Передача энергии импульсами: а – схема, б – временная диаграмма.

Для создания импульса замыкается левый ключ, правый разомкнут, энергия от источника переходит в

накопитель. В качестве накопителя используется емкость (конденсатор) или индуктивность (реактор). Во время паузы левый ключ размыкается, замыкается правый, энергия из накопителя переходит к потребителю энергии. В такой технологии энергия магнитного поля линии не возвращается в источник (левый ключ разомкнут), отсутствует циркуляция энергии по линии.

В результате увеличивается переданное количество энергии при том же ее расходе в линии или уменьшается расход в линии при том же количестве переданной.

Описанная технология возможна при наличии элементов, способных выполнять функцию ключей. Они должны обладать быстродействием порядка сотен наносекунд, допустимым током килоамперы, десятки килоампер, допустимым напряжением десятки, сотни киловольт, иметь приемлемые габариты. В настоящее время элементная база силовой электроники имеет следующие параметры [3].

По быстродействию – длительность коммутации составляет 1–10 нс.

По коммутируемому напряжению и току – для выпрямительных диодов предельные характеристики составляют 10 кВ и 8 кА. Для тиристоров 8 кВ и 4 кА. Биполярные транзисторы с полевым управлением IGBT являются наиболее применимым элементом силовой электроники. Максимально допустимое напряжение – сейчас до 6,5 кВ, ток до 1,2 кА. В ближайшие годы напряжение увеличится до 8 кВ.

Приемлемые габариты обеспечиваются переходом от использования дискретных компонентов к силовым электронным системам – интегральным элементам, в которых в одном кристалле (чипе) объемом 0,1 дм<sup>3</sup> содержится устройство, способное выполнять функции преобразователя энергии – выпрямителя, преобразователя частоты или напряжения.

Из приведенных параметров делается вывод, что существуют предпосылки для применения импульсной технологии в диапазоне десятков мегаватт. В настоящее время объекты применения силовой электроники в электроэнергетике – преобразователи для электропередач и вставок постоянного тока, регуляторы потока мощности, накопители электрической энергии [3, 4].

Передача постоянного тока в общем случае содержит преобразователь переменного тока в постоянный, линию передачи, преобразователь постоянного тока в переменный, фильтры высших гармоник, генерируемых преобразователями. Переменный ток источника преобразуется в постоянный, проходит по линии передачи и преобразуется в переменный на другом ее конце.

Регуляторы мощности содержат выпрямители, инверторы и конденсаторные батареи. Изменением напряжения на конце линии, к которому подключено устройство, регулируется направление и величина потока мощности и активной и реактивной.

Накопители электрической энергии содержат преобразователь переменного тока в постоянный и обратно и собственно накопитель в виде индуктивности или емкости. При необходимости изъять энергию из сети и сохранить ее в накопителе преобразователь работает в режиме выпрямителя, переменный ток преобразуется в постоянный и энергия накапливается в электрическом поле конденсатора или в магнитном поле реактора. Для передачи накопленной энергии из накопителя в сеть преобразователь работает в режиме инвертора, напряжение (ток) накопителя преобразуется в переменное (переменный) и поступает в сеть.

Из приведенного выше сделаны следующие выводы.

1. В настоящее время энергия магнитного поля линии передачи является фактором, вызывающим дополнительные потери энергии. Задача полезного ее использования время не решена.
2. Существует элементная база силовой электроники, способная реализовать технологию передачи энергии с использованием энергии магнитного поля линии.
3. Функциональные узлы, необходимые для реализации импульсной передачи энергии, существуют и работают в современной электроэнергетике.

Цель работы – представить результаты исследований импульсной технологии передачи энергии, обеспечивающей пониженный расход энергии в линии за счет использования энергии магнитного поля.

Для достижения цели необходимо знать соотношения между параметрами различных элементов электропередачи. Наиболее общими являются соотношения теоретические, полученные в символическом виде. Это определило первую задачу исследования.

Изменение магнитного поля линии импульсами вызывает эффекты, отсутствующие или незначимые в аналоговой передаче, например, поверхностный эффект или физиологическое воздействие на организм человека. При реализации технологии следует оценить их значимость. Это определило вторую задачу исследования.

Результаты исследования Для увеличения энергетической эффективности передачи используется индуктивность передающей линии. Энергия, накопленная в магнитном поле линии передается в емкость (конденсатор). Емкость локализует энергию вблизи нагрузки и формирует импульсы тока. Схема представлена на рис. 2.

Передача энергии от источника  $U$  в нагрузку  $R_H$  по линии с сопротивлением  $R_L$  и индуктивностью  $L_L$  осуществляется посредством ключей  $K_1, K_2$  и емкости  $C$  (рис. 2, а). Сначала замыкается  $K_1$ , разомкнут  $K_2$ , происходит заряд емкости. Когда ток снизится до нуля, размыкается  $K_1$ , замыкается  $K_2$ , энергия из емкости передается нагрузке  $R_H$  (рис. 2, б).

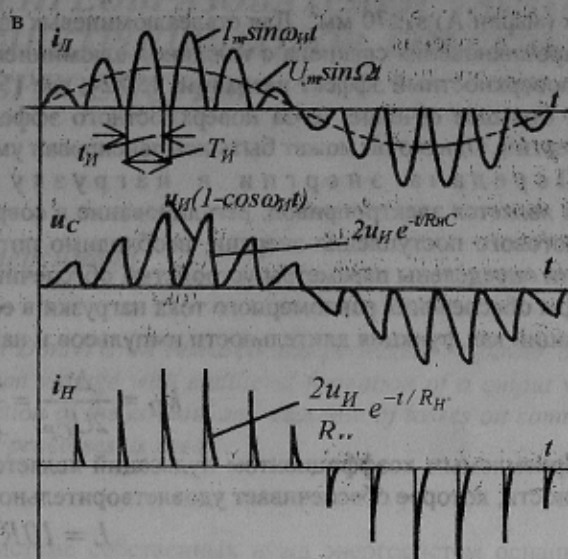
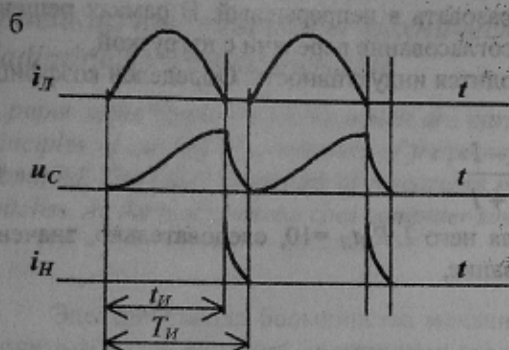
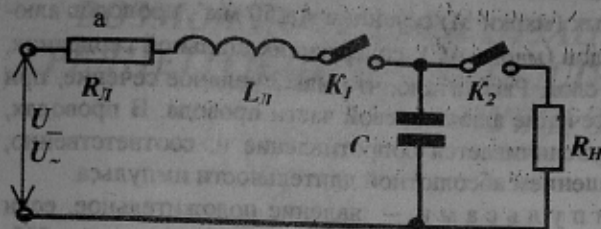


Рис. 2. Принцип передачи энергии импульсами по линии с индуктивностью: а – схема, б – временная диаграмма процесса в импульсе. в – временная диаграмма процесса передачи переменного тока.

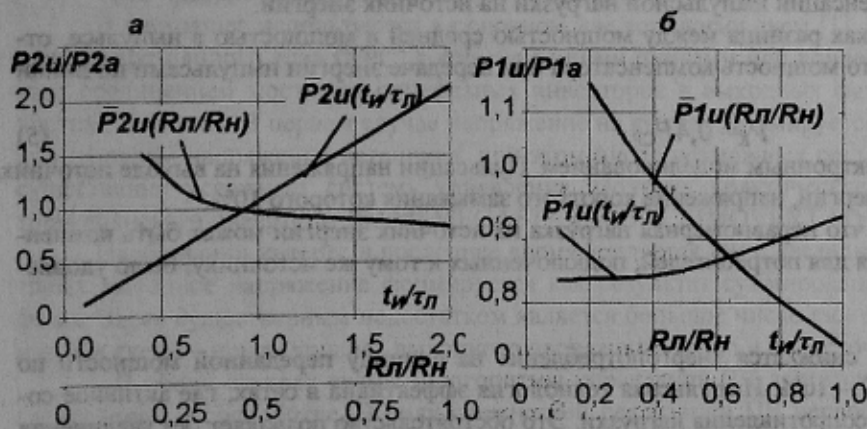
Отношение мощностей, передаваемых в импульсе  $P_{2И}$  и при аналоговой передаче  $P_{2А}$

$$\frac{P_{2И}}{P_{2А}} = \frac{2}{\pi^2} \cdot \frac{t_{И}}{\tau_L} \left( \sqrt{\frac{R_L}{R_H}} + \sqrt{\frac{R_H}{R_L}} \right)^2 \quad (1)$$

где  $t_{И}$  – длительность импульса,

$\tau = R_L/L_L$  – электромагнитная постоянная времени линии.

Отношение мощностей, потребленных при импульсной и аналоговой передачах на единицу переданной мощности



$$\frac{P_{1И}}{P_{1А}} = \frac{1 + t_{И}/4\tau_L}{1 + R_L/R_H} \quad (2)$$

Зависимости (1), и (2) представлены на рис. 3. Из графиков видно, что существуют условия, при которых по линии передается большая мощность ( $t_{И}/\tau_L > 1$ ,  $R_L/R_H > 1$ ) при импульсной передаче, чем при аналоговой.

Энергопотребление при импульсной передаче ниже, чем при аналоговой при той же переданной мощности. Относительное снижение энергопотребления тем больше, чем больше сопротивление линии. Снижение расхода энергии в линии практически не зависит от рода тока, которым передается энергия – постоянный или переменный. Оно является существенным (десятки процентов) и определяется отношением длительности импульса к электромагнитной постоянной времени линии.

Импульсный ток в линии передачи обуславливает явления, способные снизить ее эффективность: увеличение активного сопротивления линии вследствие поверхностного эффекта, передача энергии в нагрузку импульсами, ухудшение качества энергии потребителей, подключенных к тому же источнику энергии, что и импульсная передача. Ниже оценивается их значимость.

Поверхностный эффект оценивается сравнением глубины проникновения электромагнитного поля в проводник линии с диаметром проводника. Определено, для каких условий импульсность не влияет на проводимость линии. Можно показать, что глубина проникновения электромагнитного поля, м, в алюминий ( $\gamma = 38 \cdot 10^6$  См/м),  $\lambda_A = 0,51\sqrt{t_{И}}$  в медь ( $\gamma = 58 \cdot 10^6$  См/м)  $\lambda_M = 0,41\sqrt{t_{И}}$ . Современные полупроводниковые ключи обеспечивают длительность импульсов порядка  $10^{-4}$  с. Тогда сечения проводника, при которых радиусы

меньше глубины проникновения, для алюминия  $\approx 82 \text{ мм}^2$ , меди  $\approx 53 \text{ мм}^2$ . На основании этих цифр делается вывод, что поверхностный эффект незначим для проводов медных (марки М) сечением  $s_M \leq 50 \text{ мм}^2$ , проводов алюминиевых (марки А)  $s_A \leq 70 \text{ мм}^2$ . Для сталеалюминевых проводов (марка АС), содержащих стальной сердечник, глубина проникновения сравнена с толщиной алюминиевого слоя. Рассчитано, что максимальное сечение, при котором поверхностный эффект незначим,  $150/24$ , где 150 – сечение алюминиевой части провода. В проводах, имеющих большее сечение, из-за поверхностного эффекта увеличивается сопротивление и, соответственно, расход энергии. Однако он может быть компенсирован уменьшением абсолютной длительности импульса.

Передача энергии в нагрузку импульсами – явление положительное, если нагрузкой является электропривод: регулирование в современном приводе импульсное. Но если нагрузка требует аналогового поступления энергии, необходимо поток преобразовать в непрерывный. В рамках решения этой задачи определены параметры устройства, обеспечивающего согласование передачи с нагрузкой.

Для обеспечения равномерного тока нагрузки в ее цепь вводится индуктивность. Определен коэффициент пульсаций как функция длительности импульсов и нагрузки:

$$k_{\Pi} = \frac{\Delta u}{2U_{CP}} = \frac{e^{t_{\Pi} R_H / L} - 1}{e^{t_{\Pi} R_H / L} + 1} \quad (3)$$

Приемлемым коэффициентом пульсаций является 5%. Для него  $L/R_H t_{\Pi} = 10$ , следовательно, значение индуктивности, которое обеспечивает удовлетворительное сглаживание,

$$L = 10 R_H t_{\Pi}.$$

значение паузы ключей К2 и К3 должно быть:

$$t_{\Pi} = \frac{\pi}{2} \sqrt{10 R_H t_{\Pi} C} \quad (4)$$

Моделированием установлено, что при этих условиях в сопротивлении нагрузки протекает удовлетворительно сглаженный ток, без существенных пульсаций (коэффициент пульсаций  $\approx 6\%$ ).

Неравномерный отбор энергии от источника в импульсной передаче приводит к снижению качества энергии у потребителей, питающихся от источника. Проблема решается введением перед преобразователем пассивных или активных устройств, компенсирующих эту неравномерность. Компенсация осуществляется отбором энергии в накопитель, когда нагрузка ниже среднего значения, и отдачей энергии из накопителя в нагрузку, когда она выше среднего значения. В качестве накопителей используются индуктивность и емкость. Эффективность компенсации зависит от установленной мощности накопителей, последняя ограничивается приемлемыми массой, габаритами и стоимостью. Необходимо определить мощности накопителей, необходимые для приемлемой компенсации импульсной нагрузки на источник энергии.

Искомая мощность определяется как разница между мощностью средней и мощностью в импульсе, отклоняющейся от средней. Определено, что мощность компенсатора при передаче энергии импульсами по линии без индуктивности

$$P_K = 0,4 P_{CP} \quad (5)$$

Результаты расчета проверены электронным моделированием. Пульсации напряжения на выходе источника составляют не более 5% с источником энергии, напряжение короткого замыкания которого 10%.

Из приведенного выше следует, что неравномерная нагрузка на источник энергии может быть компенсирована так, чтобы качество напряжения для потребителей, подключенных к тому же источнику, было удовлетворительным.

#### Выводы

1. При импульсной технологии снижается энергопотребление на единицу переданной мощности по сравнению с аналоговой передачей на 50 – 10%. Импульсная технология эффективна в сетях, где активное сопротивление линии составляет более 0,2 сопротивления нагрузки. Это обстоятельство позволяет без увеличения расхода энергии увеличить нагрузку на существующие линии или выполнить вновь создаваемые линии с меньшим сечением проводов.

2. Отрицательные явления, возникающие при передаче энергии импульсами, являются либо незначимыми (поверхностный эффект), либо могут быть компенсированы известными техническими решениями.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дацишин Б.Я. Эффективність роботи енергопостачальних компаній у 2003 р. та основні напрямки їх діяльності на 2004 р. *Енергетика і Електрифікація*, №4, 2004, с. 2 – 4.
2. Энергосберегающая технология электроснабжения народного хозяйства: В 5 кн.: *Практ. пособие/Под ред. В. А. Веникова*. Кн. 1. Снижение технологического расхода энергии в электрических сетях/Д. А. Арзамасцев, А. В. Липес. — М.: Высш. шк., 1989.— 127 с: ил.
3. Ивакин В.Н., Ковалев В.Д. Перспективы применения силовой преобразовательной техники в электроэнергетике. *Электричество* №9, 2001 г., с.30 – 37.
4. Болдырев Е.А. Работа преобразовательных устройств нового класса в электропередачах переменного и постоянного тока. *Электричество* №9, 2001 г., с.68 – 76.

Рекомендовано до друку д.т.н. проф. Дудніком М.З.