

ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ДЛЯ SMART GRID

Работа посвящена передаче электроэнергии импульсами (квантами).

Актуальность темы обусловлена возможностью снизить потери в линии передачи и сделать поток энергии управляемым.

Состояние вопроса. В настоящее время электроэнергия передается электрическим током аналоговым образом от источника постоянного или переменного тока. При этом электрический ток обуславливает потери энергии в омическом сопротивлении линии и магнитный поток линии, в который энергия источника поступает, но не передается потребителям. Существующие средства управления потоком энергии, например, гибкие системы передачи энергии переменного тока (FACTS), выравнивают поток энергии в течение периода тока элементами, способными запасать энергию в электрическом или магнитном полях. Используются конденсаторы, реакторы, выпрямители и инверторы, устроенные из полупроводниковых элементов, работающих в ключевом режиме (тиристоры, IGBT транзисторы). При этом попыток передать потребителю энергию магнитного поля линии не делается. Потери абсолютные в омическом сопротивлении линии неизбежны, но потери относительные к переданной мощности можно уменьшить, передавая потребителю энергию магнитного поля линии.

В информационных технологиях импульсная передача применяется преимущественно. Это обусловлено большими, чем при передаче аналоговой, плотностью информации, надежностью и возможностью управлять ее потоком. Преимущества обеспечиваются сущностью импульсов – наличием паузы и простотой получения импульсов – элементом, работающим в режиме ключа: «открыто» – «закрыто».

В силовой электроэнергетике импульсные технологии применяются для обработки материалов и преобразования электрической энергии в механическую в электроприводе, и применяются успешно.

Приведенные соображения позволяют предположить, что импульсная технология окажется эффективной при передаче электрической энергии. По крайней мере, существует ниша, совокупность условий, при которых возможность повысить КПД передачи и управлять потоком энергии окажутся востребованными. Представляется, что такой нишей являются объекты Smart Grid, так как основными особенностями интеллектуальных энергетических систем является возможность управлять потоком и регулировать затраты электроэнергии.

Цель работы – представить импульсную технологию передачи электроэнергии и определить рациональную область ее применения.

Материалы и результаты исследования.

Схема передачи импульсами от источника постоянного тока (рис. 1) содержит

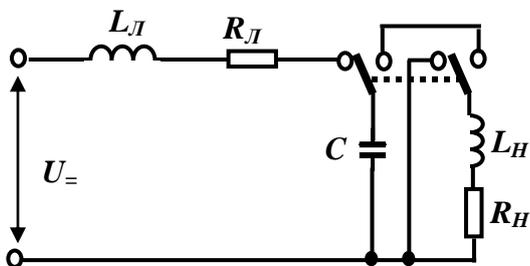


Рисунок 1 – Схема передачи энергии импульсами.

источник энергии, линию из сопротивления и индуктивности, полупроводниковый ключ, конденсатор, сопротивление и индуктивность нагрузки. Схема функционирует следующим образом. Для передачи энергии по линии ключ соединяет конденсатор с источником, по линии проходит ток заряда конденсатора в течение половины периода колебаний контура индуктивность линии – конденсатор, энергия передается от источника в конденсатор.

Когда ток снизится до нуля, в конденсаторе окажется энергия и электрического поля источника, и магнитного поля линии. Затем конденсатор подключается к нагрузке, которой передается его энергия.

Рациональная область применения определяется на основе зависимостей, связывающих энергетические параметры электропередачи с временными параметрами импульсов. Критерий рациональности – относительные потери мощности в линии.

Первый такт – передача энергии от источника в конденсатор.

Ток линии и напряжение на конденсаторе [1, с. 79]

$$i_L = \frac{U}{\omega_L L_L} e^{-b_L t} \sin \omega_L t, \quad (1)$$

$$u_{C1} = U \left(1 - e^{-b_L t} \cos \omega_L t - e^{-b_L t} \frac{b_L}{\omega_L} \sin \omega_L t \right), \quad (2)$$

$$\omega_L = \sqrt{\frac{1}{L_L C} - b_L^2}, \quad b_L = \frac{R_L}{2L_L}.$$

Энергия и мощность, переданные по линии,

$$W_L = \int_0^{\frac{T_L}{2}} u_C i_L dt, \quad (3)$$

$$P_{Лп} = \frac{2}{T_L} W_L, \quad (4)$$

где $T_L = 2\pi/\omega_L$.

Потери мощности в омическом сопротивлении линии

$$p_L = \frac{2}{T} R_L \int_0^{\frac{T}{2}} i_L^2 dt. \quad (5)$$

В формулах обозначены: i_L – ток линии, А; u_C – напряжение на конденсаторе, мгновенное значение, В; ω_L – собственная частота колебаний контура линия – конденсатор, c^{-1} ; L_L – индуктивность линии, Гн; b_L – коэффициент затухания линии, c^{-1} ; T_L – период собственных колебаний, с; R_L – сопротивление линии, Ом; W_L – энергия, переданная в конденсатор по линии за половину периода, ВАс; P_L – мощность, передаваемая в импульсе тока, ВА; p_L – потери мощности в линии, ВА.

Решением приведенных уравнений и алгебраическими преобразованиями определены:

передаваемая по линии импульсом мощность, средняя за полпериода,

$$P_{И} = \frac{\omega_L U^2}{2\pi L_L (\omega_L^2 + b_L^2)} \left(1 + e^{-\pi \frac{b_L}{\omega_L}} \right)^2, \quad (6)$$

потери мощности в линии

$$p_{И} = \frac{U^2}{2\pi L_L} \frac{\omega_L}{\omega_L^2 + b_L^2} \left(1 - e^{-2\pi \frac{b_L}{\omega_L}} \right), \quad (7)$$

относительные потери

$$\frac{p_{И}}{P_{И}} = \frac{1 - e^{-\pi \frac{b_L}{\omega_L}}}{1 + e^{-\pi \frac{b_L}{\omega_L}}}. \quad (8)$$

Принято, что относительные потери в линии при передаче энергии постоянным током

$$\frac{p_{\pm}}{P_{\pm}} = \frac{R_L}{R_H}. \quad (9)$$

Область параметров, в которых относительные потери в линии меньше при передаче импульсами

$$\frac{P_{II}}{P_{\approx}} < \frac{P_{\approx}}{P_{\approx}} \rightarrow \frac{1 - e^{-\frac{\pi R_{Л}}{2\rho}}}{1 + e^{-\frac{\pi R_{Л}}{2\rho}}} < \frac{R_{Л}}{R_{H}}. \quad (10)$$

R_H – сопротивление нагрузки, объекта, в который передается электроэнергия, Ом.

Можно показать, что при условии $\rho \gg R_{Л}$ (волновое сопротивление цепи индуктивность линии – конденсатор существенно больше, чем ее омическое сопротивление) область меньших потерь описывается неравенством

$$\rho_{Л} > \frac{\pi}{4}(R_H + R_{Л}), \quad (11)$$

где $\rho_{Л} = \sqrt{L_{Л}/C}$ – указанное волновое сопротивление, Ом.

Из формулы следует, что при заданных параметрах линии и нагрузки подбором емкости конденсатора можно обеспечить потери в линии меньше, чем в передаче постоянного тока.

Импульсная технология применима и для передачи энергии от источника переменного тока – однофазного или трехфазного. Схема представлена на рис.2. Ключи одновременно подключают линии фаз к конденсаторам и, когда токи в них снижаются до нуля, – к нагрузкам фаз.

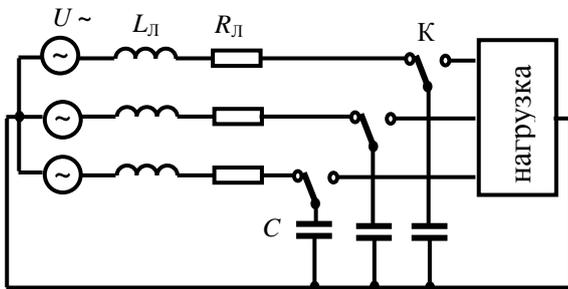


Рисунок 2 – Схема электропередачи от источника переменного тока

Ключи одновременно подключают линии фаз к конденсаторам и, когда токи в них снижаются до нуля, – к нагрузкам фаз.

Передаваемая по линии мощность определяется как сумма энергий, переданных в конденсаторы импульсами за период источника переменного тока (для частоты 50 Гц – за 20 мс), разделенная на длительность периода. Потери мощности в линии определяются как сумма потерь в импульсах в течение периода переменного тока, разделенная на длительность периода.

Таким образом определены для импульсной передачи от трехфазного источника мощность передаваемая, средняя за период,

$$P_{\approx II} \cong \frac{3}{4\pi} \frac{U_m^2}{\rho} \left(1 + e^{-\frac{\pi R_{Л}}{2\rho}} \right)^2, \quad (12)$$

мощность потерь во всех фазах

$$P_{\approx I} \cong \frac{3}{4\pi} \frac{U_m^2}{\rho} \left(1 - e^{-\frac{\pi R_{Л}}{2\rho}} \right), \quad (13)$$

относительные потери

$$\frac{P_{\approx I}}{P_{\approx II}} = \frac{1 - e^{-\frac{\pi R_{Л}}{2\rho}}}{1 + e^{-\frac{\pi R_{Л}}{2\rho}}}, \quad (14)$$

В формулах обозначены, кроме приведенных выше: $P_{\approx II}$, $P_{\approx I}$ – мощность, передаваемая от источника переменного трехфазного тока по линии импульсами и потери в фазах линии, ВА; U_m – амплитуда фазного напряжения источника, В.

Рациональная по относительным потерям область применения импульсной технологии

$$\frac{P_{\approx I}}{P_{\approx II}} < \frac{R_{Л}}{R_H}, \quad (15)$$

где $R_{Л}/R_H$ – относительные потери в линии при передаче переменным током.

После подстановки выражения (14) в условие (15) и алгебраических преобразований область меньших потерь описывается неравенством

$$\rho > \frac{\pi}{4}(R_H + R_L), \quad (11)$$

то есть тем же, что и при передаче от источника постоянного тока.

Второй такт – передача энергии от конденсатора нагрузке. Заряженный в первом такте конденсатор подключен последовательно нагрузке, состоящей из индуктивности и активного сопротивления. Ток нагрузки разряжает конденсатор до нуля, в этот момент ключ должен разорвать цепь, иначе конденсатор перезарядится, и часть энергии уйдет в линию при подключении конденсатора к линии.

Исходные уравнения для анализа процесса разряда конденсатора на нагрузку [1, с. 75]

$$u_{C2} = U_C e^{-b_H t} \left[\cos \omega_H t + \left(\frac{b_H}{\omega_H} - \frac{1}{CR_H \omega_H} \right) \sin \omega_H t \right], \quad (16)$$

$$i_H = \frac{U_C}{\omega_H} e^{-b_H t} \left(\frac{\omega_H}{R_H} \cos \omega_H t + \frac{1}{2L_H} \sin \omega_H t \right). \quad (17)$$

Кроме того, из закона сохранения энергии следует

$$\frac{CU_C^2}{2} = I_H^2 R_H T_H. \quad (18)$$

В формулах обозначены: U_C и u_{C2} , – начальное и мгновенное напряжения разряда на конденсаторе, В; $b_H = R_H / 2L_H$ – коэффициент затухания контура нагрузка – конденсатор, c^{-1} ;

$\omega_H = \sqrt{\frac{1}{L_H C} - b_H^2}$ – собственная частота колебаний контура нагрузка – конденсатор, c^{-1} ; R_H – омическое сопротивление нагрузки, Ом; L_H – индуктивность нагрузки, Гн; T_H – период импульсов, с.

Принято допущение $\rho_H / R_H \gg 1$, где $\rho_H = \sqrt{L_H / C}$ – волновое сопротивление цепи конденсатор – нагрузка, Ом. Тогда алгебраическими преобразованиями можно показать, что среднее значение тока нагрузки

$$I_H \approx \frac{U_C}{2\sqrt{\pi R_H \rho_L}} \approx \frac{U}{\sqrt{\pi R_H \rho_L}}, \quad (19)$$

приращение тока нагрузки в импульсе

$$\Delta I_H \approx \frac{U_C R_H}{2\rho_H^2} \approx U \frac{R_H}{\rho_H^2}. \quad (20)$$

Из этих выражений следует, что током нагрузки можно управлять изменением волнового сопротивления линии (например, включением в линию реактора), и что пульсации тока в нагрузке могут быть снижены до приемлемого значения увеличением волнового сопротивления цепи конденсатор – нагрузка (опять же, включением в цепь нагрузки реактора или дросселя).

В ы в о д ы . Передача электроэнергии импульсами обеспечивает возможность снизить потери мощности в линии передачи как от источника постоянного, так и переменного токов. Снижение имеет место, когда волновое сопротивление цепи линия – конденсатор больше омического сопротивления линии и нагрузки.

Обусловленные импульсной передачей пульсации тока в нагрузке могут быть уменьшены увеличением индуктивности в цепи нагрузки.

Возможность управлять потоком энергии и потерями ее, которые обеспечивает импульсная передача, соответствуют идеологии Smart Grid.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Гинсбург С.Г. Методы решения задач по переходным процессам в электрических цепях. - М.: «Высшая школа». -1967, 388 с.

Название доклада: «ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ДЛЯ SMART GRID»

Сведения об авторах:

должность – доцент кафедры «Электромеханика и теоретические основы электротехники»
Донецкого национального технического университета;

ученая степень – канд. техн. наук;

ученое звание – доцент;

почтовый адрес – 83001, Донецк, Артема, 58, ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (ДонНТУ).

E-mail: markchashko@rambler.ru;

Телефон: +380504743874