

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПУЛЬСАЦИОННЫЕ ПОТЕРИ МОЩНОСТИ В СИЛОВЫХ ТЯГОВЫХ ЦЕПЯХ ЭПС ПОСТОЯННОГО ТОКА

Викладені результати досліджень, що вказують на споживання неактивної (реактивної) потужності електрорухомим складом постійного струму. Показано, що це споживання приводить до додаткових втрат електроенергії у тягових колах ЕРС.

Изложены результаты исследований, указывающие на потребление неактивной (реактивной) мощности электроподвижным составом постоянного тока. Показано, что это потребление приводит к дополнительным потерям электроэнергии в тяговых цепях ЭПС.

Results of researches are stated in article specifying on consumption of inactive jet capacity by the electric rolling stock of a direct current. It is shown, that this consumption brings to additional loss of electric power.

Разработка энергосберегающих технологий, а также режимов работы существующих систем была и остается актуальной проблемой во всех отраслях промышленности и производства, тем более в современных условиях Украины. Система электрического транспорта постоянного тока не исключение в этом вопросе. Действительно, существующее на сегодня убеждение о том, что электроподвижной состав (ЭПС) постоянного тока потребляет только активную энергию, является ошибкой, поскольку данный ЭПС является динамической (параметрической) нагрузкой, то есть нестационарным во времени потребителем электроэнергии. В результате напряжение на токоприемнике и тяговый ток являются случайными процессами, обусловленными технологическими факторами. С другой стороны, система электрической тяги постоянного тока «тяговые подстанции с фильтроустройствами – контактная сеть – электровагоны» представляют собой совокупность реактивных сопротивлений разного характера и сравнительно небольшого активного сопротивления. Таким образом, в потребляемой электровагоном мощности возникает неактивная составляющая, которая вызывает дополнительные потери энергии в его силовой цепи и поэтому необходимо оценить уровень этих потерь.

На сегодняшний день самым перспективным подходом к определению реактивной мощности, в том числе и в нестационарных системах, является концепция С. Фризе [1]. Согласно ей, любой изменяющийся ток $i(t)$ в любой момент времени может быть представлен в виде суммы двух составляющих – активного тока $i_a(t)$, который совпадает по фазе и форме с приложенным напряжением, и реактивного тока $i_p(t)$

$$i(t) = i_a(t) + i_p(t), \quad (1)$$

где $i_a(t) = \frac{P}{U^2} u(t)$, – составляющая тока, пропорциональная функции напряжения $u(t)$; P – активная мощность, потребляемая нагрузкой (ЭПС) за время T ; U – действующее значение напряжения $u(t)$ за время T . В результате получаем следующие соотношения:

$$\frac{1}{T} \int_0^T i(t) u(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T i_a(t) u(t) dt = P, \quad (2)$$

поскольку

$$\frac{1}{T} \int_0^T i_p(t) u(t) dt = 0. \quad (3)$$

Из последней формулы следует, что исключение из состава полного тока $i(t)$ его реактивной составляющей не приводит к изменению потребляемой в системе активной мощности, так как полезную работу совершает лишь активный ток, а реактивный бесполезно пульсирует между источником и потребителем. Такое разделение тока на составляющие – математическая абстракция, однако оно связано с вполне определенными причинами – наличием в силовой цепи накопителей электромагнитной энергии – и поэтому позволяет оценить уровень дополнительных потерь в системе от протекания реактивного тока.

При таком разделении тока ЭПС (далее нагрузки) на составляющие реактивная мощность Фризе (которая вызывает дополнительные потери в силовых цепях) $Q_\Phi = \sqrt{S^2 - P^2}$ (S – полная мощность) равна произведению дейст-

вующего значения U напряжения $u(t)$ на действующее значение I_p тока $i_p(t)$: $Q_\Phi = UI_p$.

Для квадрата действующего значения I тока $i(t)$ справедливо выражение

$$I^2 = I_a^2 + I_p^2 = \frac{P^2}{U^2} + \frac{Q_\Phi^2}{U^2},$$

где $I_a = P/U$ – действующее значение тока $i_a(t)$.

Из последней формулы следует, что компенсация реактивной мощности Фризе (уменьшение Q_Φ) при неизменных P и U аналогична минимизации действующего значения тока I генератора, которая осуществляется посредством подключения параллельно нагрузке компенсатора с током $i_k(t) = -i_p(t)$. При этом компенсатор согласно выражению (3), не будет потреблять активную мощность.

В неидеализированных цепях, где в качестве источника используется генератор напряжения конечной мощности, компенсация Q_Φ приводит к минимизации потерь при передаче энергии от генератора к нагрузке, которые пропорциональны I^2 .

Обменная мощность $Q_{об}$ определяется на основе разделения мгновенной мощности $p(t) = u(t) \cdot i(t)$ на составляющие:

$$p(t) = p_0(t) + p_n(t),$$

где $p_0(t)$, $p_n(t)$ – соответственно мгновенная мощность преобразования электромагнитной энергии в другие виды и мгновенная мощность накопления. При таком разделении

$$Q_{об} = \frac{W_{об}^+}{T} = \frac{1}{T} \int_0^{t^+} p_n(t) dt,$$

где $W_{об}^+$ – энергия, запасенная в реактивных элементах цепи за интервал времени t^+ , то есть когда $p(t) \geq 0$ и энергия передается из генератора в нагрузку.

Накопленная на интервале t^+ энергия $W_{об}^+$ в течение интервала времени $t^- = T - t^+$, когда $p(t) < 0$, частично рассеивается в активных элементах цепи и возвращается в генератор. Следовательно,

$$Q_{об} = \frac{W_{об}^+}{T} = -P^- + \frac{1}{T} \int_0^{t^-} p_0(t) dt, \quad (4)$$

где $P^- = \frac{1}{T} \int_{t^+}^{t^-} p(t) dt$.

Из выражения (4) следует, что компенсация

$Q_{об}$ устраняет возврат энергии из нагрузки в генератор ($Q_{об} = 0$ при $t^- = 0$).

Поскольку природа реактивной мощности двойственна, то есть, это мера недоиспользования мощности источника (Q_Φ) за счет повышенных потерь и мера обменных процессов ($Q_{об}$), то компенсация первой – это минимизация активных потерь в нагрузке и сети, а второй – устранение возврата энергии из нагрузки в генератор.

Очевидно, что при $Q_\Phi = 0$ обменная мощность также равна нулю, однако равенство нулю $Q_{об}$ не влечет за собой равенство нулю Q . Это еще раз подтверждает то, что в цепях с несинусоидальными, а тем более случайными, токами и напряжениями классические выражения реактивной мощности не применимы. Реактивная мощность в системах с такими по характеру электрическими величинами может возникать и при отсутствии обменной мощности, т. е. если будет всегда $p(t) \geq 0$.

Мощности $Q_{об}$ и Q_Φ , как характеристики эффективности работы системы генератор-потребитель, не взаимозаменяемы. Реактивная мощность Фризе характеризует величину дополнительных потерь при передаче энергии, обменная мощность – интенсивность обмена электромагнитной энергией между генератором и потребителем.

На рис. 1 представлены графики мгновенных активного $I_a(t)$ и реактивного $I_p(t)$ токов электровоза ВЛ8 для одной из поездок. Эти составляющие были выделены из тягового тока электровоза при помощи выражения (1). Активный ток повторяет форму напряжения на токоприемнике $U(t)$, т. е. при таком характере изменения тягового тока ($I(t) = I_a(t)$) для данной поездки коэффициент мощности равнялся бы единице.

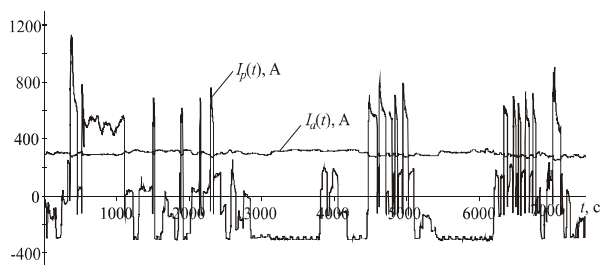


Рис. 1

Определим составляющие потерь электроэнергии в силовой цепи электровоза. Поскольку активное сопротивление нестационарного элемента системы электропотребления (ЭПС) в общем случае зависит от времени (изменяется слу-

чайно), то активные потери в этом элементе за время T от полного тока равны

$$\Delta P = \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) R(t) dt.$$

Для определения составляющих потерь от протекания реактивной мощности представим ток электропровода в виде суммы активной и реактивной составляющих:

$$i(t) = \frac{p_a(t)}{u(t)} + \frac{q(t)}{u(t)},$$

где $p_a(t)$ и $q(t)$ – соответственно мгновенная активная и реактивная мощности потребителя. В результате потери активной мощности от реактивной составляющей тока определяются как

$$\Delta P_p = \frac{1}{T} \int_0^T i_p^2(t) R(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{q^2(t)}{u^2(t)} R(t) dt.$$

С другой стороны эти потери мощности можно найти через эквивалентное значение реактивной мощности (мощности Фризе) как [2]

$$\Delta P_p = \frac{Q_\Phi^2}{U^2} R,$$

где $R = \frac{1}{T} \int_0^T R(t) dt$ – эквивалентное сопротивление нестационарного потребителя (силовых цепей электропровода) за время T .

Таким образом, потери мощности в системе от реактивного тока являются дополнительными, а потери от активного тока – необходимыми. Мощность $Q_\Phi = 0$, если ток будет пропорционален напряжению на протяжении всего времени потребления T мощности. Для этого необходимой является компенсация мощности Q_Φ , с помощью компенсирующего устройства.

По аналогии с видами потерь мощности в тяговых двигателях пульсирующего тока (по В. Скобелеву) все виды потерь мощности в силовых тяговых цепях ЭПС можно подразделить на потери, имеющие место при протекании неизменного тока и потери, обусловленные колебаниями, т.е. пульсациями тока, названные добавочными пульсационными потерями. Причем, по нашему мнению, в тяговых цепях следует различать микропульсации (относительно высокочастотные), обусловленные формой выпрямленного тока и макропульсации (низкочастотные), обусловленные колебаниями технологической нагрузки. Первые дополнительные пульсационные потери

детально проанализированы В. Скобелевым, мы же в данной работе определяем вторые пульсационные потери. Физически эти потери обусловлены передачей по силовым цепям ЭПС реактивной энергии, то есть, упомянутой выше реактивной составляющей полного тока единицы ЭПС.

В результате расчетов для ряда поездок электропровода ВЛ8 было установлено, что потери активной электроэнергии в силовой цепи в среднем находятся в пределах 6...11 % энергии, затраченной электропроводом за поездку в сумме на тягу и работу вспомогательных цепей. Причем, большая доля этих потерь вызвана протеканием в цепи неактивной составляющей потребляемого тока. Например, полный расход энергии электропровода за одну из поездок составил 3296 кВт·ч, а ее потери в силовой цепи составили 270 кВт·ч, что составляет 8,2 % от общего расхода. Потеря активной энергии в силовой цепи от протекания реактивного тока составила 186 кВт·ч, т. е. 69 % всех потерь. Соответственно, потеря энергии от полезного (активного) тока составила 31 % от всей энергии за поездку. Эти потери в первую очередь возникают в активных сопротивлениях тяговых двигателей, потери же в стали (от гистерезиса и от вихревых токов) тяговых двигателей менее существенны, поскольку спектры напряжения на двигателях в основном содержат низкие частоты. Аналогично потерям в активных сопротивлениях силовой цепи электропровода происходят и потери энергии в контактной сети.

Таким образом, возникает задача уменьшения неактивной составляющей тягового тока, и как следствие, снижение уровня потерь активной мощности в силовых цепях ЭПС постоянного тока. Для этого необходимо применение ряда мероприятий, одним из которых является компенсация реактивной составляющей полного тока ЭПС с помощью компенсирующего устройства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тонкаль В. Е. Компенсация неактивных составляющих полной мощности в цепях несинусоидального тока и напряжения. Техническая Электродинамика / В. Е. Тонкаль, В. Я. Жуйков, С. П. Денисюк. 1989, № 5. – С. 26–29.
2. Денисюк С. П. Оцінка складових втрат електроенергії в системах електроживлення з нелінійними нестационарними перетворювачами електроенергії. Пр. інст-ту електродинаміки НАН України. Електротехніка. – К., 1999. – С. 60.
3. Рогальський Б. С. Економічні еквіваленти реактивної потужності та їх використання / Б. С. Рогальський, О. М. Нанака. Вісник ВПІ, 2005, № 6. – С. 126–129.

Поступила в редколлегию 07.06.2007.