

Для цитирования: Бадалян Н.П., Колесник Г.П., Соловьёва С.Г., Чащин Е.А. Продольная компенсация реактивной мощности в короткой сети электродуговой печи. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45 (2):42-51. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-42-51

For citation: Badalyan N.P., Kolesnik G.P., Solovyova S.G., Chashchin E.A. Series compensation of reactive power in a low-voltage circuit of the electric arc furnace. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45(2):42-51. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-42-51

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.311.001

DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-2-42-51

ПРОДОЛЬНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В КОРОТКОЙ СЕТИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЕЧИ

Бадалян Н.П.¹, Колесник Г.П.², Соловьёва С.Г.³, Чащин Е.А.⁴

¹⁻³Владимирский государственный технический университет имени А.Г.
и Н.Г. Столетовых,

¹⁻³ 600000, г. Владимир, ул. Горького 87, Россия,

⁴ Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева,

⁴ 601910, г. Ковров, Владимирская обл., ул. Маяковского, 19, Россия,

¹⁻³e-mail: norayrbadalyan@mail.ru, ⁴e-mail: kanircha@list.ru

Резюме: Цель. Целью исследования является повышение энергетической эффективности в системе электроснабжения и короткой сети дуговой печи. В соответствии с целью исследования поставлена актуальная задача определения емкости конденсаторов для компенсации реактивной мощности и выбора рационального места их установки. **Метод.** В рамках ранее разработанной концепции изменения параметров трансформатора продольного включения в схеме продольной компенсации рассматриваются вопросы эффективного использования и потребления электрической энергии линейной нагрузкой большой мощности при синусоидальном режиме. Принимаем в работе для повышения эффективности дуговой печи установку статических конденсаторов с прямым методом компенсации с автоматическим управлением, предусматривающую 12 ступеней регулирования. Рассмотрена возможность повышения эффективности электропитания дугowych печей переменного тока компенсацией реактивной мощности в короткой линии. **Результат.** Обоснована целесообразность применения схемы продольной компенсации реактивной мощности с включением конденсаторов в обмотку высшего напряжения трансформатора продольного включения. **Вывод.** В работе показано, что для эффективного использования и потребления электрической энергии линейной нагрузкой большой мощности при синусоидальном режиме, целесообразно применять схемы продольной компенсации реактивной мощности с включением конденсаторов в обмотку высшего напряжения трансформатора продольного включения. Это позволяет увеличить коэффициент полезного действия устройств электропитания электродуговых печей, уменьшить потери мощности в системе электроснабжения и короткой сети печи в 1,6 раз и снизить в 1,36 раз полную нагрузку в силовом трансформаторе.

Ключевые слова: энергоэффективность, переменный ток, реактивная мощность, продольная компенсация, компенсирующая емкость, вольтодобавка, коэффициент мощности, электродуговая печь, короткая сеть, трансформатор

TECHNICAL SCIENCE
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

SERIES COMPENSATION OF REACTIVE POWER IN A LOW-VOLTAGE CIRCUIT OF
THE ELECTRIC ARC FURNACE

Norayr P.Badalyan¹, Grigory P.Kolesnik², Sofia G.Solovyova³, Yevgeny A.Chaschin⁴

¹⁻³ Alexander and Nikolay Stoletovs Vladimir State University,

¹⁻³87 Gorkog Str., Vladimir 600000, Russia,

⁴ V.A. Degtyarev Kovrov State Technological Academy,

⁴19 Mayakovskogo Str., Kovrov 601910, Vladimir region, Russia,

¹⁻³e-mail: norayrbadalyan@mail.ru, ⁴e-mail: kanircha@list.ru

Abstract Objectives The aim of the study is to increase the energy efficiency of an arc furnace's power supply system and low-voltage circuit. According to the aim of the research, the relevant tasks of determining the capacitor capacity for reactive power compensation and selecting a rational location for its installation are posed. **Methods** Within the framework of the previously developed concept of changing the parameters of the switching transformer in the series compensation circuit, issues of efficient use and consumption of electrical energy by a high power linear load under sinusoidal mode are considered. The installation of static compensators using a direct compensation method with automatic control including 12 stages of regulation is proposed as a means of increasing the efficiency of the arc furnace. Challenges involved in increasing the efficiency of electric power supply to alternating current arc furnaces using compensating reactive power in a low-voltage circuit are considered. **Results** The viability of using the series compensation circuit of reactive power with the switching of capacitors in the winding of the higher voltage of the series switching transformer is demonstrated. **Conclusion** It is shown that for efficient use and consumption of electric energy by high-power linear load under sinusoidal conditions, it is advisable to apply the series compensation of reactive power with the switching of capacitors in the winding of the higher voltage of the series switching transformer. This makes it possible to increase the efficiency coefficient of electric arc furnace power supply devices by reducing the power losses in the power supply system and in the furnace low-voltage circuit by 1.6 times, as well as reducing the total load in the power transformer by 1.36 times.

Keywords: energy efficiency, alternating current, reactive power, series compensation, compensating capacity, accessory voltage, power coefficient, electric arc furnace, low-voltage circuit, transformer

Введение. В настоящее время, в литейном производстве стали широко используются электрические плавильные печи [1], основными из которых являются индукционные – канальные и тигельные, а также дуговые печи переменного тока.

Основным недостатком индукционных и тигельных печей является то, что они технологически пассивны, поэтому качественный металл при их использовании можно получить только из высококачественной шихты, что позволяет получать высокое качество отливок только при небольшом объеме производства, а при увеличении объемов производства существенно повышает себестоимость металлургического передела.

Кроме того, индукционная плавка, при которой вокруг или под металлом расположены водоохлаждаемые элементы, изолированные от расплава тонким слоем футеровки, является потенциально взрывоопасной [2]. Альтернативой применению индукционных печей, с точки зрения промышленной безопасности и технологической перспективности, является использование взрывобезопасных и технологически активных дуговых печей переменного тока, позволяющие получать высококачественный металл из шихты практически любого качества [3]. Однако ряд недостатков этих печей затрудняет их эксплуатацию, основным из которых является работа с относительно низким коэффициентом мощности, что приводит к большим потерям энергии в короткой сети. Это делает актуальным решение вопроса повышения энергетической эффективности в системе электроснабжения и короткой сети дуговой печи.

Постановка задачи. Известно, что в цепях переменного тока при линейной нагрузке эффективность использования и потребления электрической энергии в установившемся режиме в основном зависят от уровня реактивной мощности, коэффициента полезного действия устройства и $\cos\varphi$, характеризующего уровень потребления реактивной мощности [4]. Поэтому практически основным фактором, позволяющим решить вопрос энергосбережения и повышения энергоэффективности использования дуговых печей переменного тока, является снижение потребления реактивной мощности.

Статья является продолжением работы [5], в которой исследованы вопросы изменения параметров трансформатора продольного включения в схеме продольной компенсации и решаются вопросы оценки приращения значений модуля и аргумента реального коэффициента трансформации в зависимости от значения компенсирующей емкости, напряжения вольтодобавки и рабочего тока электрода. Это делает актуальным исследование вопроса повышения эффективности использования и потребления электрической энергии линейной нагрузкой большой мощности при сиусоидальном режиме.

Методы исследования. Решим поставленную актуальную задачу определения емкости конденсаторов для компенсации реактивной мощности и выбора рационального места их установки.

Энергоэффективность дуговой печи. Известно большое количество решений в направлении энергосбережения для вопросов, связанных с эксплуатацией электрооборудования в номинальном режиме, когда ток для реальных потребителей, как правило, изменяется в диапазоне 5-10% от тока короткого замыкания [6]. Однако эксплуатация наиболее распространенных в промышленности круглых трехфазных ферросплавных дуговых печей с расположением электродов треугольником (табл. 1), отличается большим технологическим диапазоном изменения мощностей от режима холостого хода до режима короткого замыкания и низким значением коэффициента мощности, составляющими 0,7 и менее. Неспокоеное горение дуги в этом случае вызвано особенностями технологического процесса, связанными с многочисленными обрывами дуги при переходе дуги с одной шихты на другие, а так же эксплуатационными короткими замыканиями, вызываемые обвалами и перемещениями проводящих частей шихты. Поэтому решение вопроса повышения энергоэффективности и энергосбережения затруднено.

Таблица 1. Технические данные ферросплавных печей
Table 1. Technical data of Ferroalloy furnaces

Технические данные	Тип печи						
	ПКО-2,5	ПКО-3,5	ПКО-10,5	ПКО-16,5 ПКЗ-16,5	ПКЗ-24	ПКЗ-33	ПКЗ-48
Мощность S , кВА	2500	3500	10500	16500	24000	33000	48000
Вторичное напряжение, В	178 – 89	371–260	250 – 100	210 – 132	245 – 155	250 – 130	238,5 – 137
Максимальный ток, кА	13,0	13,0	38,4	59,0	71,0	87,0	111,8
Диаметр электрода $d_э$, мм	300–450	300–450	800	1200	1200	1500	2800x650
Диаметр ванны $d_в$, мм	2700	2700	4000	6200/6700	7200	8700	20340x6000
Глубина ванны h , мм	1200	1300	1700	2300	2600	3000	2850

Современные энергосберегающие технологии в промышленности, предполагают широкое использование конденсаторные батарей для компенсации реактивной мощности [7], отличающихся малым уровнем потерь активной мощности, составляющей 3-5 Вт на 1 квар и возможностью установки батарей вблизи электроприёмников. При использовании конденсаторных установок с автоматическим управлением возможна компенсация реактивной мощности прямым и косвенным методами.

Статические управляемые компенсаторы при прямом методе компенсации включают кон-

денсаторные батареи с тиристорными переключателями, при этом необходимую реактивную мощность генерируют конденсаторы. При косвенном методе компенсации постоянная реактивная мощность генерируется с помощью конденсаторов, которые входят в состав фильтров высших гармоник, а дополнительное регулирование реактивной мощности осуществляется с помощью фазоуправляемых тиристорных ключей и реакторов. Статические управляемые компенсаторы обладают более высоким быстродействием и могут быть использованы в схемах электроснабжения с резкопеременной нагрузкой.

Принимаем в работе для повышения эффективности дуговой печи установку статических компенсаторов с прямым методом компенсации с автоматическим управлением, предусматривающей 12 ступеней регулирования. В общем случае, для оценки энергоэффективности электрооборудования, с учетом несинусоидальных искажений, удобно использовать энергетический коэффициент [6,8]:

$$k_y = \frac{P_{\dot{a}\dot{a}\dot{o}}}{P_{\dot{a}\dot{o}}} \frac{I_1}{I} \cos \varphi, \quad (1)$$

где $P_{\text{вых}}, P_{\text{вх}}$ – активные выходная и входная мощности; I_1, I – действующие значения первой гармоники тока и несинусоидального периодического тока; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности.

Коэффициент мощности (1) показывает фазовый сдвиг между первыми гармониками напряжения и тока:

$$\cos \varphi = P_{\dot{a}\dot{o}} / \sqrt{P_{\dot{a}\dot{o}}^2 + Q^2 + D^2}, \quad (2)$$

где Q – реактивная мощность; D – мощность небаланса.

В дальнейших расчетах принимаем влияние высших гармоник пренебрежимо малым, $D = 0$.

Компенсация реактивной мощности. Короткая сеть дуговой ферросплавной печи, как правило, включает в себя ошиновку в трансформаторной камере, гибкую кабельную гирлянду, трубошину, электрододержатель и электрод [9]. Электрический баланс мощной ферросплавной печи показывает [1], что потери в короткой сети составляют около 35% общих потерь или 7-15% подведенной мощности, причем значение потерь токопроводящей сети при больших токах возрастает сильнее, чем значение полезной мощности печи. Поэтому расчеты короткой сети выполняют обычно по режиму, определяемому превышением полезной мощности над потерями электроэнергии в короткой сети при достаточно высоком $\cos \varphi$.

Однако при таком подходе, обеспечение удовлетворительных электрических характеристик дуговой печи при заданном рабочем напряжении все более затрудняется по мере увеличения мощности печи ввиду роста индуктивного сопротивления контура. Так же следует отметить, что типовые мероприятия, направленные на уменьшение активного и реактивного сопротивления короткой сети, базируются в основном на выполнении требований к электродинамической и термической устойчивости токоведущих проводников, что позволяет определить рациональное соотношение между длиной, взаимному расположению и сечению токопровода [1]. Однако подобный подход не рассматривает условия компенсации реактивной мощности.

Конструктивные особенности типовых серийно выпускаемых дуговых печей (табл. 1) содержащих трехобмоточный трансформатор, предполагают возможным выполнять мероприятия по повышению коэффициента мощности системы электроснабжения электродуговой печи, как на стороне высшего напряжения (ВН), так и на стороне среднего (СН) или низшего (НН) напряжения. Реализация мероприятий по энергосбережению компенсацией реактивной мощности на стороне ВН позволяет реализовать достижение основных требований к коэффициенту мощности, но не решает проблему потерь мощности в короткой сети. Кроме того, с увеличением мощности электродуговой печи увеличивается и питающее напряжение, что значительно усложняет решение проблемы компенсации реактивной мощности. Техническая реализация компенсирующей установки на стороне НН связана с увеличением габаритных размеров и усложнением монтажа короткой сети из-за больших значений тока компенсации НН в несколько десятков тысяч ампер. Это делает нецелесообразным повышение эффективности дуговой печи на стороне НН.

Обсуждение результатов. Проведенный анализ показал, что наиболее целесообразной ока-

зывается компенсация реактивной мощности на стороне СН, которая может быть конструктивно выполнена либо параллельно, либо последовательно. При параллельной компенсации реактивной мощности на стороне СН, так же как при компенсации на стороне ВН, не решается вопрос потери мощности в короткой сети.

Рассмотрим последовательную компенсацию реактивной мощности на стороне СН, иначе продольную компенсацию. При продольной компенсации, поскольку компенсационные электрические емкости оказываются включенными последовательно с нагрузкой в главном контуре, реактивная мощность конденсатора зависит от величины протекающего через плавящийся электрод дуговой печи тока и, следовательно, меняется с колебанием реактивной мощности под нагрузкой. Это позволяет выполнять компенсацию реактивной мощности в реальном времени без изменения напряжения рабочей шины. Следует отметить, что при продольной компенсации, по сравнению с параллельной компенсацией, может повышаться, за счет напряжения вольтодобавки, вторичное напряжение печного трансформатора. Последнее может увеличивать активную мощность, потребляемую электродуговой печью.

Рассмотрим упрощенную схему включения компенсирующей емкости C (в однофазном приближении) в обмотку СН трехобмоточного трансформатора T_1 последовательно с обмоткой высшего напряжения вольтодобавочного трансформатора T_2 без дополнительных элементов защиты от коммутационных перенапряжений на конденсаторе (рис. 1).

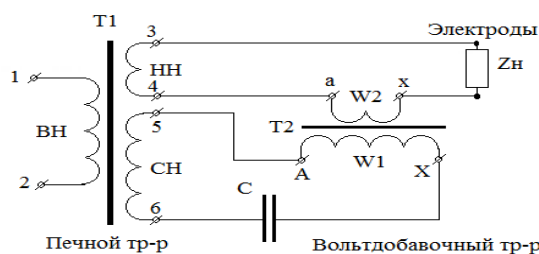


Рис. 1. Схема включения компенсирующей емкости в обмотку СН трех-обмоточного трансформатора

Fig. 1. The scheme of inclusion of the compensating capacity in the winding SN three-winding transformer

Оценим влияние компенсирующей емкости C на режим работы электродуговой ферросплавной печи. Пренебрегая, с целью упрощения, особенностями расположения обмоток ВН, СН и НН на стержнях трехобмоточного печного трансформатора, составим схему замещения установки продольной компенсации (рис. 2).

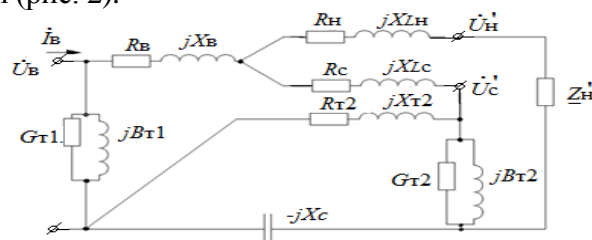


Рис. 2. Схема замещения установки продольной компенсации с компенсирующей емкостью на стороне СН

Fig. 2. Equivalent circuit of installation of the longitudinal compensation with the compensating capacitance on the side of SN

В полученной схеме (рис. 2) схему замещения трансформатора T_1 представим трехлучевой звездой, а трансформатора T_2 – Г-образной прямой схемой замещения без учета трансформации (рис. 1). Ветви намагничивания включаем на первичных зажимах трансформаторов (зажимы 1-2 для T_1 и зажимы А-Х для T_2).

Параметры схемы замещения трехобмоточного трансформатора T_1 (рис. 2) – активные и реактивные сопротивления обмоток ВН, СН и НН приведены к напряжению первичной обмотки трансформатора. Ветвь намагничивания включена на первичных зажимах схемы замещения и ее параметры определяются так же, как и для двухобмоточных трансформаторов [10- 11].

Реактивные сопротивления X_c и X_n соответственно обмоток СН и НН расположены меж-

ду двумя другими обмотками, из-за их взаимного влияния, и имеют значения близкие к нулю, либо пренебрежимо малые отрицательные значение. В работе принимаем их равными нулю.

В паспортных данных трехобмоточного трансформатора как правило приводят либо три нормированных, т.е. приведенных к номинальной мощности, значения напряжения короткого замыкания [11] $U_{кв}, U_{кс}, U_{кн}$ и одно $\Delta P_{кв-с}$ или $\Delta P_{кв-н}$, либо три значения потерь мощности короткого замыкания $\Delta P_{кв-н}, \Delta P_{кв-с}, \Delta P_{кс-н}$.

Для трехобмоточного трансформатора с одинаковыми мощностями обмоток, суммарные потери короткого замыкания на пару обмоток поровну распределяются между соответствующими обмотками. Таким образом, активные сопротивления лучей схемы замещения (рис. 2) с учетом паспортных данных удобно определить:

$$R_a = R_n = R_l = \frac{1}{2} \Delta P_{\Sigma} U_m^2 / S_m^2 \quad (3)$$

При расположении обмотки СН между обмотками ВН и НН вкладом реактивного сопротивления можно пренебречь $X_{LC} = 0$, а при расположении обмотки НН между обмотками ВН и СН можно пренебречь вкладом $X_{LN} = 0$. С учетом сделанных допущений и упрощений расчетная схема замещения принимает вид (рис. 3).

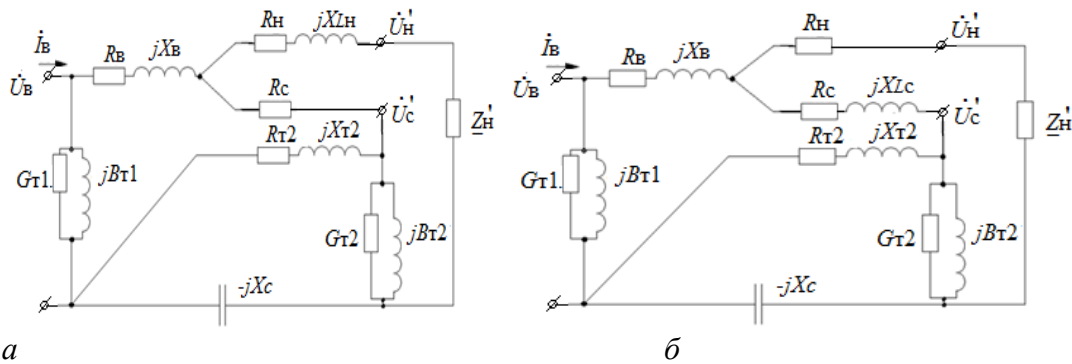


Рис. 3. Схема замещения установки продольной компенсации: а - с компенсирующей емкостью на стороне СН при $X_{LC} = 0$. б - с компенсирующей емкостью на стороне СН при $X_{LN} = 0$

Fig. 3. Equivalent circuit of the longitudinal compensation unit: a-with compensating capacity on the side of SN at $X_{LC} = 0$. b-with compensating capacity on the CH side at $X_{LN} = 0$

В схеме короткой сети, двухобмоточный трансформатор T_2 (рис. 1) представлен простой Г-образной схемой замещения – прямой с подключением ветви проводимостей со стороны ВН. Однако следует отметить, что в рассматриваемой схеме, это напряжение следует отнести к СН трансформатора T_1 , поскольку трансформатор T_2 является понижающим. Таким образом, в расчетах параметры элементов первичной обмотки трансформатора T_2 и ее нагрузка приведены к обмотке НН.

Известно, что в полнофазном режиме двухобмоточного трансформатора потери мощности в трех фазах равны утроенному значению фазных потерь [10], т. е.

$$\Delta P_{\Sigma} = 3\Delta P_{\Sigma\phi} \quad (4)$$

Соответственно, линейное напряжение и номинальная мощность трансформатора составляют:

$$U_m = \sqrt{3} \tilde{A} U_{\Sigma\phi}, \quad S_m = 3\Delta P_{\Sigma\phi} \quad (5)$$

Тогда активное сопротивление обмоток двухобмоточного трансформатора можно определить по паспортным данным, Ом:

$$R_{\Sigma 2} = \Delta P_{\Sigma} U_m^2 / S_m^2 \times 10^{-3} \quad (6)$$

Принимая, что индуктивное сопротивление трансформатора X_{T2} зависит от напряжения короткого замыкания $U_{к}$, можно видеть, что полное сопротивление трансформатора с учетом выражения (6), Ом:

$$Z_{T2} = R_{\Sigma 2} + jX_{T2} = \frac{U_{\Sigma}}{100} \times \frac{U_m^2}{S_m^2} \quad (7)$$

Для оценки влияния компенсирующей емкости на режим работы электродуговой ферросплавной печи при расположении обмотки СН между обмотками ВН и НН необходимо определить входной ток компенсирующей установки I_B или ток нагрузки на стороне НН по схеме замещения (рис. 3, б).

Параметры элементов схемы по рис. 2 могут быть определены по паспортным данным трансформаторов T_1 и T_2 с учетом соотношений (1-7): потерям холостого хода и короткого замыкания, току холостого хода и напряжению короткого замыкания, номинальному напряжению и номинальной полной мощности, значению коэффициента трансформации идеального трансформатора. Без учета влияния ветвей намагничивания трансформаторов T_1 и T_2 схема замещения рис. 3 принимает вид (рис. 4).

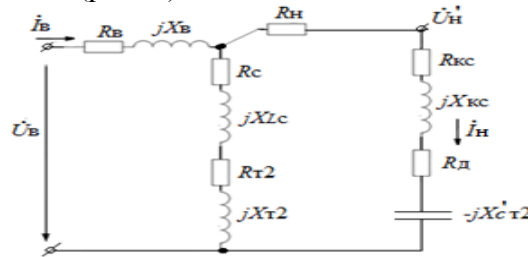


Рис. 4. Схема замещения компенсирующей установки при исключении ветвей намагничивания

Fig. 4. An equivalent circuit of the compensation unit to the exclusion of the branches of the magnetization

Схема замещения короткой сети ферросплавной электродуговой печи с нагрузочным сопротивлением электрической дуги R'_D , приведенному к обмотке высшего напряжения трансформатора T_1 , активным R_{KC} и реактивным X_{KC} сопротивлениями короткой сети, сопротивлением компенсирующей емкости X'_{CT2} , приведенным к обмотке НН трансформатора T_2 , включенных на НН трансформатора T_1 , показана на рис. 5, где элемент R' это сумма активных сопротивлений обмотки НН трансформатора T_1 , короткой сети и электрической дуги.

$$R' = R_i + R_{en} + R_{\dot{a}}. \quad (8)$$

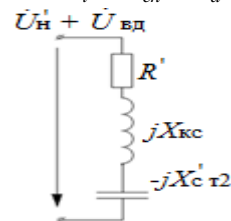


Рис. 5. Схема замещения короткой сети с нагрузочным сопротивлением электрической дуги и сопротивлением компенсирующей емкости

Fig. 5. Equivalent circuit of a short network with load resistance of an electric arc and resistance of compensating capacity

Следует отметить, что при больших токах электрическую дугу при инженерных расчетах с достаточной степенью точности целесообразно моделировать активным неизменным во времени сопротивлением, поскольку её динамическая характеристика линейна и ток дуги пропорционален напряжению. При этом ток дуги и напряжение сохраняют синусоидальную форму. Тогда напряжение на нагрузке определяется суммой напряжения НН \dot{U}'_H трансформатора T_1 и напряжения НН трансформатора T_2 (напряжения вольтодобавки $\dot{U}_{\dot{a}\dot{a}}$). С учетом вышеизложенного, ток нагрузки можно определить:

$$\dot{I}_t = \frac{\dot{U}'_t \pm \dot{U}_{\dot{a}\dot{a}}}{R' + jX_{en} - jX'_{CT2}}. \quad (9)$$

Таким образом, реактивную мощность компенсирующей емкости для заданного типа дуговой ферросплавной печи с известными характеристиками печного трансформатора можно вычислить по параметрам рабочего режима обмотки СН $U_c, I_c, \cos\phi_1$, без учета нагрузочных потерь активной мощности в короткой сети и трансформаторах, и значению реализуемого ко-

ээффициента мощности $\cos\varphi_2$ после компенсации:

$$Q_e = UI \cos\varphi_1 (tg\varphi_1 - tg\varphi_2), \quad (10)$$

или емкость компенсирующего конденсатора (рис. 2), мкФ:

$$C = Q_e / 2\pi f U^2 \times 10^3, \quad (11)$$

где U – напряжение на зажимах конденсатора, кВ; f – частота питающей сети, Гц; Q_k – реактивная мощность конденсатора, кВАр.

Видно, что полученные формулы (10, 11) соответствуют каноническому виду [12], что подтверждает справедливость сделанных допущений и выводов. Результаты расчета на примере ферросплавной печи ПКЗ-48 (табл. 1) по формулам (3-11) в соответствии со схемой замещения (рис. 5) приведены на рис. 6. Для приведенного примера принимаем напряжение U равным 99 В, а сопротивление линии R составит 0,002 Ом. Видно, что полная нагрузка в короткой линии до компенсации составляет:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3.5^2 + 3.5^2} = 4.95 \text{ МВА}$$

Тогда ток в короткой линии до компенсации можно оценить:

$$I = S / \sqrt{3} U = 4.59 \cdot 10^6 / \sqrt{3} \cdot 99 = 28870 \text{ А}$$

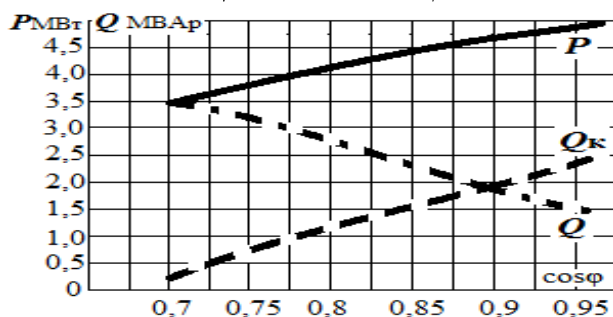


Рис. 6. Графики зависимости активной и реактивной мощностей ферросплавной электродуговой печи от коэффициента мощности: рабочие параметры режима $U=99$ В

Fig. 6. Graphs of the dependence of the active and reactive power of the Ferroalloy electric arc furnace on the power factor: operating parameters of the mode $U=99$ V

При этом активные потери в линии составляют:

$$\Delta P = I^2 R = 28870^2 \cdot 0.002 \approx 1.65 \text{ МВт}$$

Для компенсации реактивной мощности в короткой линии установлена компенсаторная установка мощностью $Q_k=2,5$ МВАр. В этом случае нагрузка линии после компенсации составит:

$$S_e = \sqrt{P^2 + (Q - Q_e)^2} = \sqrt{3.5^2 + 1.0^2} = 3.64 \text{ МВА},$$

ток, протекающий в короткой в линии:

$$I_e = S_e / \sqrt{3} U = 3.64 \cdot 10^6 / \sqrt{3} \cdot 99 = 21230 \text{ А}, \text{ а активные потери в линии}$$

$$\Delta P_e = I_e^2 R = 21230^2 \cdot 0.002 \approx 0.89 \text{ МВт}.$$

Таким образом, видно, что ток в короткой линии с применением компенсаторной установки уменьшается в 1,46 раз, активные потери со стороны короткой линии снизились на 27%, а полная нагрузка трансформатора уменьшилась с 4,95 МВА до 3,64 МВА.

Оценим изменение уровня потерь в трансформаторе при компенсации реактивной мощности по предложенному способу со стороны короткой линии.

$$\Delta W = \Delta P_{\text{дд}} T_{\text{д}} + \Delta P_{\text{кз}} \frac{S^2}{S_{\text{ном}}^2} T, \quad (12)$$

где $\Delta P_{\text{дд}}$ – потери холостого хода; $\Delta P_{\text{кз}}$ – потери короткого замыкания; $S, S_{\text{ном}}$ – мощность загрузки трансформатора и его номинальная мощность соответственно; $T_{\text{д}}=8760$ час. – продолжительность работы трансформатора в течение года; T – продолжительность работы трансформатора под нагрузкой.

Согласно ГОСТ 11677-85 уровень потерь $\Delta P_{\text{дд}}$ и $\Delta P_{\text{кз}}$ нормируются в зависимости от $S_{\text{ном}}$

трансформатора. Принимаем, для ориентировочной оценки эффективности энергосбережения, что номинальная мощность составляет 4,8 МВА, а мощность потерь холостого хода и короткого составит 8 и 37 кВт соответственно. Тогда результаты расчета по формуле (12) показывают, что при трехфазном режиме работы ($T = 8400$ час.), потери в трансформаторе до компенсации реактивной мощности составят 375 кВт·час и уменьшаться в 1,6 раз до уровня 235 кВт·час после компенсации по предложенному способу.

Вывод. В работе показано, что для эффективного использования и потребления электрической энергии линейной нагрузкой большой мощности при синусоидальном режиме, целесообразно применять схемы продольной компенсации реактивной мощности с включением конденсаторов в обмотку высшего напряжения трансформатора продольного включения. Что позволяет увеличить коэффициент полезного действия устройств электропитания электродуговых печей, уменьшить потери мощности в системе электроснабжения и короткой сети печи в 1,6 раз и снизить в 1,36 раз полную нагрузку в силовом трансформаторе.

Библиографический список:

1. Мортимер Д. Х. Индукционная плавка: технологии будущего существуют сегодня // *Электротехнология*. 2000, № 10. С. 23–35.
2. Афонаскин А.В. Результаты первого этапа освоения дугового плавильного агрегата постоянного тока нового поколения на ОАО "Курганмашзавод" // *Литейное производство*. 2000, № 11. С. 20–23.
3. Малиновский В. С., Дубинская Ф. Е. Техничко-экономические и экологические аспекты альтернативных технологий плавки металла в дуговых печах // *Электротехнология*. 1999, № 3. С. 8–16.
4. Бадалян Н.П., Чашин Е.А. Построение математической модели допустимого установившегося режима электроэнергетической системы // *Вестник ИГЭУ*. 2012, №3. С. 43–47.
5. Бадалян Н.П., Колесник Г.П., Соловьева С.Г. Изменение параметров трансформатора продольного включения в схеме продольной компенсации // *Вестник НПУА*. 2017, № 2. С. 33–42.
6. Кудрин Б.И., Минеев А.Р. *Электрооборудование промышленности*. М.: Издательский центр «Академия», 2008. 432 с.
7. Афонин А.М. *Энергосберегающие технологии в промышленности*. М.: ФОРРУМ: ИНФРА, 2013. 272 с.
8. Бурман А.П., Розанов Ю.К., Шакарян Ю.Г. *Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем*. М.: Издательский дом МЭИ, 2012. 336 с.
9. Данцис Я. Б., Кацевич Л. С, Жилев Г. М. *Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей*. М.: *Металлургия*, 1987. 320 с.
10. Герасименко А. А., Федин В.Т. *Передача и распределение электрической энергии*. М.: КНОРУС, 2012. 648 с.
11. Серебряков А.С. *Трансформаторы*. М.: Издательский дом МЭИ, 2013. 360 с.
12. Дьяков В.И. *Типовые расчеты по электрооборудованию*. М.: Высшая школа, 1991. 169 с.

References:

1. Mortimer D. Kh. Induksionnayaplavka: tekhnologii budushchegosushchestvuyutsegodnya. *Elektrometallurgiya*. 2000;10:23–35. [Mortimer D. Kh. Induction melting: the technologies of the future exist today. *Electrical Metallurgy*. 2000;10:23–35. (in Russ.)]
2. Afonaskin A.V. Rezul'taty pervogo etapa osvoeniya dugovogo plavil'nogo agregata postoyannogo toka novogo pokoleniya na ОАО "Kurganmashzavod". *Liteinoe proizvodstvo*. 2000;11:20–23. [Afonaskin A.V. The results of the first stage of development of the direct current arc melting unit of a new generation at JSC "Kurganmashzavod". *Foundry. Technology and equipment*. 2000;11:20–23. (in Russ.)]
3. Malinovskii V. S., Dubinskaya F. E. Tekhniko-ekonomicheskie i ekologicheskie aspekty al'ternativnykh tekhnologii plavki metalla v dugovykh pechakh. *Elektrometallurgiya*. 1999;3:8–16. [Malinovskii V. S., Dubinskaya F. E. Technical and economic and environmental aspects of alternative technologies for melting metal in arc furnaces. *Electrical Metallurgy*. 1999;3:8–16. (in Russ.)]

4. Badalyan N.P., Chashchin E.A. Postroenie matematicheskoi modeli dopustimogo ustanovivshegosya rezhima elektroenergeticheskoi sistemy. Vestnik IGEU. 2012;3:43–47. [Badalyan N.P., Chashchin E.A. Construction of a mathematical model of the permissible steady-state regime of the electric power system. Vestnik IGEU. 2012;3:43–47. (in Russ.)]
5. Badalyan N.P., Kolesnik G.P., Solov'eva S.G. Izmenenie parametrov transformatora prodol'nogo vlyucheniya v skheme prodol'noi kompensatsii. Vestnik NPUA. 2017;2:33–42. [Badalyan N.P., Kolesnik G.P., Solov'eva S.G. Changing the parameters of the series switched transformer in the series compensation circuit. Vestnik NPUA. 2017;2:33–42. (in Russ.)]
6. Kudrin B.I., Mineev A.R. Elektrooborudovanie promyshlennosti. M.: Izdatel'skii tsentr "Akademiya"; 2008. 432 s. [Kudrin B.I., Mineev A.R. Electrical equipment of industry. M.: publishing centre "Akademiya"; 2008. 432 p. (in Russ.)]
7. Afonin A.M. Energosberegayushchie tekhnologii v promyshlennosti. M.: FORRUM: INFRA; 2013. 272 s. [Afonin A.M. Energy-saving technologies in industry. M.: FORRUM: INFRA; 2013. 272 p. (in Russ.)]
8. Burman A.P., Rozanov Yu.K., Shakaryan Yu.G. Upravlenie potokami elektroenergii i povyshenie effektivnosti elektroenergeticheskikh sistem. M.: Izdatel'skii dom MEI; 2012. 336 s. [Burman A.P., Rozanov Yu.K., Shakaryan Yu.G. Managing electricity flows and increasing the efficiency of electric power systems. M.: Publishing House MEI; 2012. 336 p. (in Russ.)]
9. Dantsis Ya.B., Katsevich L.S., Zhilov G.M. Korotkie seti i elektricheskie parametry dugovykh elektropечи. M.: Metallurgiya; 1987. 320 s. [Dantsis Ya.B., Katsevich L.S., Zhilov G.M. Low-voltage circuits and electrical parameters of electric arc furnaces. M.: Metallurgiya; 1987. 320 p. (in Russ.)]
10. Gerasimenko A. A., Fedin V.T. Peredacha i raspredelenie elektricheskoi energii. M.: KNORUS; 2012. 648 s. [Gerasimenko A. A., Fedin V.T. Transmission and distribution of electrical energy. M.: KNORUS; 2012. 648 p. (in Russ.)]
11. Serebryakov A.S. Transformatory. M.: Izdatel'skii dom MEI; 2013. 360 s. [Serebryakov A.S. Transformers. M.: Publishing House MEI; 2013. 360 p. (in Russ.)]
12. D'yakov V.I. Tipovye raschety po elektrooborudovaniyu. M.: Vysshaya shkola; 1991. 169 s. [D'yakov V.I. Typical calculations for electrical equipment. M.: Vysshaya shkola; 1991. 169 p. (in Russ.)]

Сведения об авторах.

Бадалян Норайр Петикович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и электроэнергетика».

Колесник Григорий Платонович – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Электротехника электроэнергетика».

Соловьева София Георгиевна – магистрант кафедры «Электротехника электроэнергетика».

Чащин Евгений Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника».

Information about the authors.

Norayr P.Badalyan – Dr. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Electrical engineering and Electric power industry

Grigory P.Kolesnik – Cand. Sci. (Technical), Prof., Department of Electrical engineering and Electric power industry.

Sofia G.Solovyova - Undergraduate Student, Department of Electrical engineering and Electric power industry

Yevgeny A.Chaschin - Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Electrical engineering.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 25.04.2018.

Принята в печать 04.06.2018.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 25.04.2018.

Accepted for publication 04.06.2018.