

РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ ЦЕПЕЙ СТАТИЧЕСКОГО ТИРИСТОРНОГО КОМПЕНСАТОРА ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЕЧИ

А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, А.С. Денисевич

*Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия*

В настоящее время большое количество металлургических заводов в России и за рубежом имеют в своем составе электросталеплавильные комплексы на базе дуговых сталеплавильных печей (ДСП) и установок ковш-печь (УКП). Данные агрегаты являются мощными электроприемниками с нелинейной вольтамперной характеристикой и резкопеременным, несимметричным характером изменения нагрузки, поэтому при работе печи наблюдаются нарушения показателей качества электрической энергии и повышение коэффициента реактивной мощности на границе балансовой принадлежности предприятия и внешней питающей сети. Для улучшения показателей качества электрической энергии и обеспечения стабилизации напряжения в точке подключения печного трансформатора электродуговой печи дополнительно применяют устройства компенсации реактивной мощности. На сегодняшний день более 85 % от общего количества компенсирующих устройств для ДСП и УКП используют статический тиристорный компенсатор (СТК), состоящий из тиристорно-реакторной группы и фильтров высших гармоник. Анализ номинальных параметров СТК различных фирм-производителей показал отсутствие универсальной методики выбора параметров фильтрокомпенсирующих цепей (ФКЦ) компенсаторов. В связи с этим актуальной задачей является разработка комплексного подхода определения оптимальной конфигурации фильтров высших гармоник при их известной суммарной мощности. Цель работы – разработка усовершенствованной методики выбора параметров ФКЦ СТК электродуговой печи, учитывающей различные критерии оптимальности, такие как стоимость ФКЦ, потери активной мощности в фильтрах высших гармоник, коэффициент фильтрации, суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения. Используемые методы: для проведения исследований использовались экспериментальные массивы электрических параметров, полученные на действующих электротехнических комплексах «ДСП-СТК», а также известные методы математического моделирования электродуговых печей и СТК. Новизна: разработанная методика расчета параметров фильтрокомпенсирующих цепей СТК отличается от известных тем, что распределение мощности между фильтрами высших гармоник осуществляется с использованием группы критериев оптимальности, что позволяет достичь наилучших технико-экономических параметров ФКЦ с учетом особенностей конкретного электросталеплавильного агрегата и его системы электроснабжения. Данная методика обладает повышенной точностью анализа электрических режимов ФКЦ за счет возможности использования реальных токов электродуговых печей разного класса и мощности. Полученные результаты: 1) выполнен анализ параметров действующих СТК различных фирм-производителей; 2) проанализированы существующие методики распределения мощности между фильтрами; 3) разработана усовершенствованная математическая модель комплекса «ДСП-СТК», позволяющая проводить детальные исследования режимов работы ФКЦ СТК с учетом реального гармонического состава токов ДСП; 4) на основании математической модели установлены закономерности изменения коэффициента фильтрации ФКЦ при различных вариантах распределения суммарной мощности между фильтрами; 5) разработана усовершенствованная методика расчета параметров ФКЦ СТК, обеспечивающая оптимальное распределение мощности между фильтрами высших гармоник с учетом совокупности различных критериев оптимальности. Практическая ценность: полученные результаты исследований имеют большую практическую значимость при проектировании и расчете параметров фильтрокомпенсирующих цепей СТК, функционирующих в системах электроснабжения электросталеплавильных комплексов.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, установка ковш-печь, статический тиристорный компенсатор, фильтры высших гармоник, тиристорно-реакторная группа, частотная характеристика, качество электроэнергии.

Введение

В настоящее время практически все крупные металлургические предприятия в своем составе имеют электросталеплавильные комплексы, включающие в себя дуговые электросталеплавильные печи, установки ковш-печь. При высокой мощности электросталеплавильных комплексов одним из важных условий является применение статических

компенсаторов реактивной мощности (СКРМ) для обеспечения заданных показателей качества электроэнергии (ПКЭ) и сохранения уровня напряжения на первичной стороне трансформатора на всех стадиях плавки ДСП [1–8].

На сегодняшний день, по данным мирового лидера по производству компенсирующих устройств компании АВВ, более 85 % от общего коли-

Преобразовательная техника

чества СКРМ для электродуговых печей построены по схеме статического тиристорного компенсатора, состоящего из тиристорно-реакторной группы (ТРГ) и фильтрокомпенсирующей цепи в составе фильтров высших гармоник. Выбор традиционных схем СТК для применения в составе электросталеплавильного комплекса обусловлен тем, что обладает более низкой стоимостью по сравнению с другим типом компенсатора СТАТКОМ, достаточным быстродействием и выполняет необходимые функции по обеспечению заданных показателей качества электроэнергии в точке общего подключения [2, 9–15].

Рациональный выбор номинальной мощности СТК играет важную роль в обеспечении оптимальных режимов работы электросталеплавильных комплексов. При выборе требуемой суммарной мощности СТК необходимо учитывать несимметричные режимы работы ДСП. Так, в работе [2] было доказано, что величина требуемой реактивной проводимости и мощности СТК для компенсации тока обратной последовательности ДСП может достигать 100 % от аналогичных составляющих, необходимых для компенсации реактивной составляющей тока прямой последовательности. На основании данных исследований была разработана усовершенствованная методика выбора номинальной мощности СТК. Необходимо отметить, что другой важной задачей является опти-

мальное распределение суммарной мощности ФКЦ между отдельными фильтрами высших гармоник. При выборе параметров ФКЦ должны учитываться потери активной мощности в элементах ФКЦ, стоимость фильтров, качество фильтрации высших гармоник, максимальные уровни токов высших гармоник в фильтрах.

На сегодняшний день отсутствуют универсальные методики выбора параметров фильтрокомпенсирующих цепей СТК. Фирмы-производители используют различные критерии при распределении мощности по фильтрам высших гармоник.

В соответствии с вышеизложенным актуальной задачей является разработка усовершенствованной методики выбора мощности фильтрокомпенсирующих цепей СТК, учитывающей несколько критериев оптимальности, таких как параметры частотной характеристики питающей сети, коэффициент фильтрации, потери активной мощности в элементах ФКЦ.

1. Анализ параметров ФКЦ действующих СТК и методик распределения мощности между фильтрами высших гармоник

В табл. 1 приведены номинальные параметры СТК различной мощности и фирм-производителей. Анализ представленных данных показал, что компания АВВ в большинстве случаев при проек-

Таблица 1

Параметры фильтрокомпенсирующих цепей СТК, функционирующих в системах электроснабжения различных электросталеплавильных комплексов

	ПАО «АМЗ», г. Аша	АО «ССЗБ», г. Балаково	ПАО «ММК», г. Магнитогорск	АО «ПНТЗ», г. Первоуральск	ЗАО «ММК Metalurji», г. Искендерун				
Электросталеплавильный агрегат	ДСП-120	ШП-125	УКП	ДСП-180	УКП	ДСП-110	УКП	ДСП-250	УКП
Масса стали на выпуске, т	120	125	125	180	180	125	120	250	250
Мощность печного трансформатора (ПТ), МВА	90	85	22	150	25	120	20	300	53
Компенсирующее устройство (КУ)	СТК-100	СТК-136,4		СТК-180		СТК-110		СТК-330	
Фирма-изготовитель	АВВ	АО «Нидек АСИ ВЭИ»		АВВ		АВВ		АВВ	
Мощность КУ и ТРГ, МВАр	100	136,4		180		110		330	
Мощность фильтра второй гармоники (Ф2), МВАр	25	25		44,62		30		69,7	
Мощность Ф3, МВАр	35	58,8		66,70		40		69,8	
Мощность Ф4, МВАр	40	52,5		68,68		40		66,5	
Мощность Ф5, МВАр	–	–		–		–		64,8	
Мощность Ф6, МВАр	–	–		–		–		59,2	
Частота настройки Ф2, о.е	1,95	1,95		1,95		1,95		1,95	
Частота настройки Ф3, о.е	2,95	2,95		2,95		2,95		2,95	
Частота настройки Ф4, о.е	3,95	3,95		3,95		3,95		3,9	
Частота настройки Ф5, о.е	–	–		–		–		4,9	
Частота настройки Ф6, о.е	–	–		–		–		5,9	
Добротность Ф2, о.е	15	40		15		15		15	
Добротность Ф3, о.е	145	267,6		282,3		80		325	
Добротность Ф4, о.е	147	230,5		243,6		80		226,8	
Добротность Ф5, о.е	–	–		–		–		246,3	
Добротность Ф6, о.е	–	–		–		–		167,7	

тировании фильтрокомпенсирующих цепей с целью минимизации потерь электроэнергии и стоимости ФКЦ делают фильтр второй гармоники минимальной мощности, при этом фильтр четвертой гармоники имеет максимальную мощность. Отечественная компания АО «Нидек АСИ ВЭИ» для СТК, функционирующего на предприятии АО «Северсталь – Сортовой завод Балаково», изготовила фильтр третьей гармоники максимальным по мощности.

Анализ зарубежной и отечественной литературы в области проектирования фильтрокомпенсирующих цепей СТК показал, что нет конкретных рекомендаций по распределению суммарной мощности ФКЦ между отдельными фильтрами высших гармоник. Так, например, в работе [8] по мнению авторов суммарная номинальная мощность ФКЦ по отдельным фильтрам высших гармоник должна распределяться пропорционально токам высших гармоник I_n . Действительно, при таком распределении мощности ФКЦ выдерживается относительная величина тока гармоник $I_n^* = I_n / I_1$ на одном уровне для всех конденсаторов, что обеспечивает наилучшее их использование, а также снижается вероятность перегрузки фильтров токами высших гармоник.

В работе [2] автором предложена методика распределения суммарной мощности ФКЦ между отдельными фильтрами высших гармоник, основанная на минимизации параллельных резонансов. При таком распределении мощности по фильтрам амплитуды параллельных резонансов 2-й и 3-й гармоник находятся на оптимальном уровне, вследствие чего имеет место эффективная фильтрация высших гармоник.

В вышеперечисленных рекомендациях по распределению суммарной номинальной мощности ФКЦ учитываются только по одному критерию оптимальности. В связи с этим актуальной задачей является разработка усовершенствованной методики выбора мощности фильтрокомпенсирующих цепей СТК, учитывающей несколько критериев оптимальности.

2. Разработка математической модели для выбора параметров фильтрокомпенсирующих цепей СТК

Важным этапом проектирования фильтрокомпенсирующих цепей является распределение установленной мощности СТК между резонансными фильтрами и определение их количества, так как в его состав входят не только фильтры высших гармоник, но и тиристорно-реакторная группа, являющаяся дополнительным источником гармоник порядка $n = 5; 7; 11; 13$, а также $n = 3$ и 9 при несимметричных углах отпирания α тиристорных ключей. Таким образом, при разделении мощностей необходимо проведение детального исследования частотной характеристики «питающая сеть –

ФКЦ» с рассмотрением нескольких конфигураций фильтров высших гармоник.

Для определения количества фильтров высших гармоник ранее был проведен анализ гармонического состава токов ДСП различного класса [3, 16–18] который показал, что в непрерывном спектре гармоник ДСП значимыми являются гармоники $n = 2 \div 11$, из которых наибольшую величину на начальной стадии плавки имеют 2, 3 и 4-я гармоники. Поэтому при выборе числа фильтров высших гармоник нецелесообразно использовать их большое количество ввиду значительного увеличения мощности реактивных элементов, что сказывается на стоимости установки и приводит к повышенным потерям электроэнергии в элементах ФКЦ. По этой причине в качестве основной конфигурации ФКЦ принимается вариант с фильтрами 2, 3 и 4-й гармоник. В качестве фильтра второй гармоники используется фильтр С-типа, благодаря которому достигается снижение пиков параллельных резонансов тока, усиливающих интергармоники в питающем напряжении сети 6–35 кВ. Добротности фильтров высших гармоник составляют: для фильтра 2-й гармоники $q_2 = 10 \div 40$, для фильтров 3-й и 4-й гармоник $q_3 = q_4 = 60$ на частоте настройки фильтров. В отдельных случаях при использовании СТК сверхвысокой мощности, например СТК 330 МВАр для ДСП-250 (300 МВА) и УКП (53 МВА), могут использоваться дополнительные фильтры 5-й и 6-й гармоник, для уменьшения массогабаритных показателей фильтров – 2, 3, 4-й гармоник.

Определение оптимального распределения суммарной мощности СТК по отдельным фильтрам высших гармоник производится в два этапа:

1) определение на математической модели основных параметров фильтров высших гармоник, установленной мощности реактивных элементов, максимального тока короткого замыкания фильтров и основных критериев оптимальной конфигурации ФКЦ (потери активной мощности в элементах ФКЦ, стоимость элементов ФКЦ, коэффициент фильтрации;

2) проверка результатов, полученных на первом этапе моделирования, на детальной математической модели комплекса «ДСП-СТК» с учетом реальных нагрузок ДСП, позволяющей выбрать из нескольких вариантов конфигурации фильтров оптимальный вариант, обеспечивающий минимальное значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения n -й гармоники в точке подключения «ДСП-СТК».

В математическом пакете MATLAB разработана математическая модель определения основных параметров фильтров и критериев оптимальности распределения суммарной мощности ФКЦ по фильтрам высших гармоник. Модель состоит из блока распределения суммарной мощности ФКЦ, в котором производится распределение $Q_{\Sigma\text{ФКЦ}}$ (рис. 1)

Преобразовательная техника

по фильтрам, поступающим на вход блока «Определение параметров фильтров», в котором производится определение параметров элементов фильтров в соответствии с уравнениями (1). Результаты расчета параметров основных элементов ФКЦ поступают на вход блока определения критериев оптимальности, где происходит расчет токов фильтров высших гармоник, потерь активной мощности в элементах ФКЦ, коэффициента фильтрации, стоимости фильтров. Расчет номинальных и максимальных токов фильтров высших гармоник, потерь активной мощности в элементах ФКЦ производится по формуле (2) для однофазной схемы замещения питающей сети 35 кВ и ФКЦ (рис. 2). Для расчета коэффициента фильтрации в модели производится вычисление комплексных сопротивлений и проводимостей питающей сети и ФКЦ. Далее в соответствии с выражением (4) строится частотная характеристика, на основании которой производится определение площадей фильтрации $S_{\text{фильт}}$ [Ом·Гц] и усиления $S_{\text{усил}}$ [Ом·Гц] гармоник в диапазоне частот от $f = 0 \div 650$ Гц. Расчет коэффициента фильтрации определяется как отношение площади фильтрации гармоник к площади усиления, производится по формуле (3). На основании результатов моделирования формируется массив вариантов конфигурации фильтрокомпенсирующих цепей.

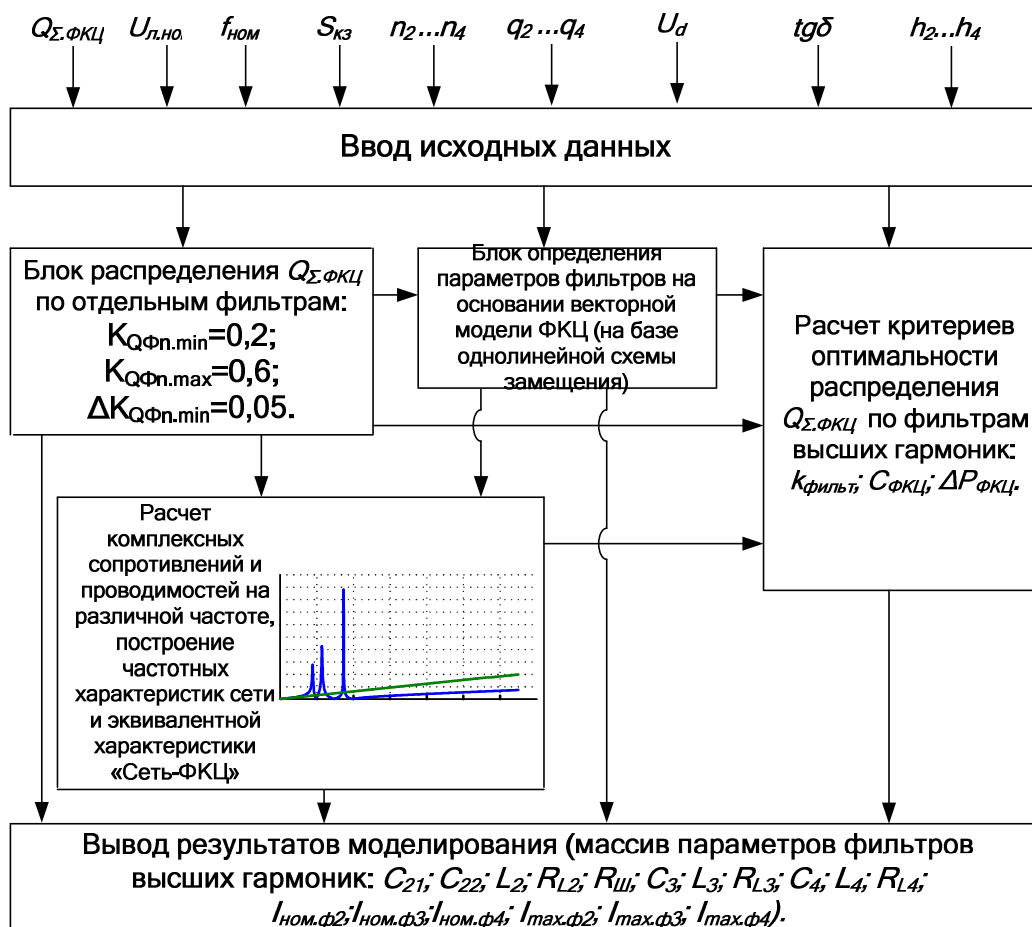


Рис. 1. Блок-схема математической модели расчета основных параметров ФКЦ и критериев оптимальности распределения суммарной мощности между фильтрами высших гармоник:

$Q_{\Sigma \text{ФКЦ}}$ – суммарная номинальная мощность ФКЦ; $U_{\text{л.но.}}$ – номинальное междуфазное напряжение сети; $f_{\text{ном}}$ – номинальная частота питающего напряжения; $S_{\text{кз}}$ – мощность короткого замыкания питающей сети; n_2, n_3, n_4 – частоты настройки фильтров высших гармоник; q_2, q_3, q_4 – добротности фильтров высших гармоник; U_d – коэффициент завышения напряжения на шинах 35 кВ; $\text{tg}\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь для конденсаторных батарей; $C_{\text{ФКЦ}}$ – стоимость ФКЦ; $K_{\text{фильт}}$ – коэффициент фильтрации; $\Delta P_{\text{ФКЦ}}$ – суммарные потери активной мощности в фильтрах; C_{21} – емкость вспомогательного конденсатора фильтра 2-й гармоники; C_{22} – емкость основного конденсатора фильтра 2-й гармоники; L_2 – индуктивность реактора фильтра 2-й гармоники; R_{L2} – активное сопротивление реактора фильтра 2-й гармоники; $R_{\text{ш}}$ – сопротивление шунтирующего резистора фильтра 2-й гармоники; C_3 – емкость основного конденсатора фильтра 3-й гармоники; L_3 – индуктивность реактора фильтра 3-й гармоники; R_{L3} – активное сопротивление реактора фильтра 3-й гармоники; C_4 – емкость основного конденсатора фильтра 4-й гармоники; L_4 – индуктивность реактора фильтра 4-й гармоники; R_{L4} – активное сопротивление реактора фильтра 4-й гармоники

$$\begin{aligned}
 L_2 &= \frac{1}{2\pi \cdot f_1} \cdot \frac{1}{n_2^2 - 1} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{Q_{\Phi 2}}; R_{L2} = \frac{1}{n_2^2 - 1} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{Q_{\Phi 2}} \cdot \frac{n_2}{q_{f2}}; C_{2.1} = \frac{1}{2\pi \cdot f_1} \cdot \frac{Q_{\Phi 2}}{U_{\text{НОМ}}^2}; C_{2.2} = \frac{1}{2\pi \cdot f_1} \cdot (n_2^2 - 1) \cdot \frac{Q_{\Phi 2}}{U_{\text{НОМ}}^2}; \\
 R_{\text{ш}} &= \frac{q_2}{n_2} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{Q_{\Phi 2}}; L_3 = \frac{1}{2\pi \cdot f_1} \cdot \frac{1}{n_3^2 - 1} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{Q_{\Phi 3}}; R_{L3} = \frac{1}{n_3^2 - 1} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{Q_{\Phi 3} \cdot q_3}; C_3 = \frac{1}{2\pi \cdot f_1} \cdot \frac{n_3^2 - 1}{n_3^2} \cdot \frac{Q_{\Phi 3}}{U_{\text{НОМ}}^2}; \\
 L_4 &= \frac{1}{2\pi \cdot f_1} \cdot \frac{1}{n_4^2 - 1} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{Q_{\Phi 4}}; R_{L4} = \frac{1}{n_4^2 - 1} \cdot \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{Q_{\Phi 4} \cdot q_4}; C_4 = \frac{1}{2\pi \cdot f_1} \cdot \frac{n_4^2 - 1}{n_4^2} \cdot \frac{Q_{\Phi 4}}{U_{\text{НОМ}}^2}.
 \end{aligned} \quad (1)$$

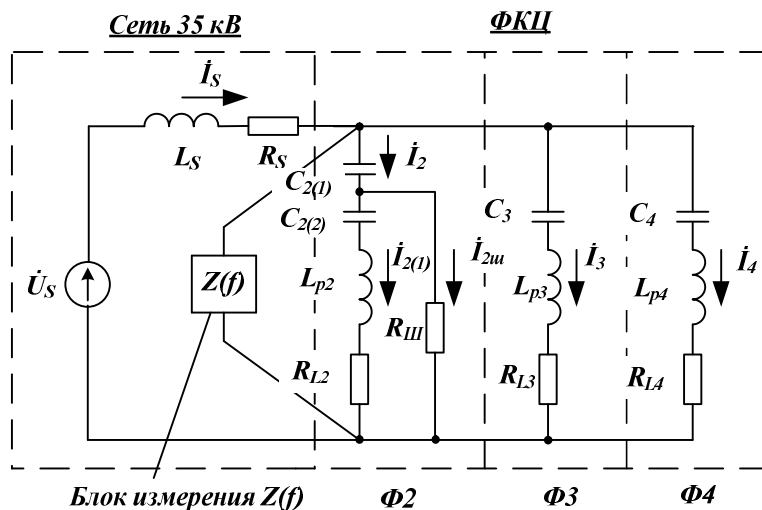


Рис. 2. Однофазная схема замещения питающей сети 35 кВ и ФКЦ, используемая для анализа режимов работы фильтров высших гармоник

Для выбора оптимального варианта распределения мощности по фильтрам высших гармоник необходимо произвести оценку полученных результатов на первом этапе моделирования на детальной математической модели электросталеплавильного комплекса «ДСП-СТК» с учетом реальных токов электросталеплавильных агрегатов. Блок-схема данной математической модели приведена на рис. 3.

$$\begin{aligned}
 I_{\text{НОМ}.n} &= \frac{Q_{\Phi.n}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}}}; I_{\text{макс}.n} = U_d \cdot I_{\text{НОМ}.n}; \Delta P_{k.n} = \frac{3 \cdot U_{k1.n}^2}{R_{\text{тг}\delta.n}}; \\
 \Delta P_{L.n} &= 3 \cdot I_{\text{НОМ}.n}^2 \cdot R_{L.n}; \Delta P_{\Sigma.n} = \Delta P_{k.n} + \Delta P_{L.n}; R_{\text{тг}\delta.n} = \frac{1}{2\pi \cdot f_1 \cdot C_n \cdot \text{tg}\delta}.
 \end{aligned} \quad (2)$$

где $Q_{\Phi.n}$ – мощность фильтра n -й гармоники, МВАр; $U_{k1.n}$ – напряжение на конденсаторной батарее, кВ; $\Delta P_{k.n}$ – потери активной мощности в конденсаторах; $\Delta P_{L.n}$ – потери активной мощности в реакторах фильтров; $\Delta P_{\Sigma.n}$ – суммарные потери активной мощности фильтра.

Выражение для коэффициента фильтрации имеет следующий вид:

$$k_{\text{фильтр}} = S_{\text{фильтр}} / S_{\text{усил}} \quad (3)$$

где $S_{\text{усил}}$ – площадь усиления гармоник; $S_{\text{фильтр}}$ – площадь фильтрации гармоник.

$$\left\{ \begin{aligned}
 \underline{Y}_{\text{сети}} &= G_{\text{сети}} - jB_{\text{сети}}; \underline{Z}_{\text{сети}} = 1 / \underline{Y}_{\text{сети}}; \\
 \underline{Z}_{\Phi 2} &= \frac{R_{L2} + j(n \cdot X_{L2} - \frac{X_{C2}}{n}) \cdot R_{\text{ш}}}{(R_2 + R_{\text{ш}}) + j((X_{L2} \cdot n) - \frac{X_{C2}}{n})} - j \frac{X_{C2}}{n}; \underline{Y}_{\Phi 2} = 1 / \underline{Z}_{\Phi 2}; \\
 \underline{Z}_{\Phi 3} &= R_{L3} + j(X_{L3} \cdot n - \frac{X_{C3}}{n}); \underline{Y}_{\Phi 3} = 1 / \underline{Z}_{\Phi 3}; \\
 \underline{Z}_{\Phi 4} &= R_{L4} + j(X_{L4} \cdot n - \frac{X_{C4}}{n}); \underline{Y}_{\Phi 4} = 1 / \underline{Z}_{\Phi 4}; \\
 \underline{Y}_{\Sigma} &= \underline{Y}_{\text{сети}} + \underline{Y}_{\Phi 2} + \underline{Y}_{\Phi 3} + \underline{Y}_{\Phi 4}; \underline{Z}_{\Sigma} = 1 / \underline{Y}_{\Sigma},
 \end{aligned} \right. \quad (4)$$

Преобразовательная техника

где $G_{сети}$ – активная проводимость питающей сети $G_{сети} = \frac{R_{сети}}{(R_{сети}^2 + (X_{сети} \cdot n)^2)}$; $B_{сети}$ – реактивная проводимость питающей сети $B_{сети} = \frac{X_{сети} \cdot n}{(R_{сети}^2 + (X_{сети} \cdot n)^2)}$; $Y_{сети}$ – полная проводимость питающей сети; $Z_{сети}$ – полное сопротивление питающей сети; $Z_{\phi 2}, Z_{\phi 3}, Z_{\phi 4}$ – полные сопротивления фильтров 2, 3, 4-й гармоник; $Y_{\phi 2}, Y_{\phi 3}, Y_{\phi 4}$ – полные проводимости фильтров 2, 3, 4-й гармоник; X_{L2}, X_{L3}, X_{L4} – индуктивные сопротивления фильтров 2, 3, 4-й гармоник; X_{C2}, X_{C3}, X_{C4} – емкостные сопротивления фильтров 2, 3, 4-й гармоник.

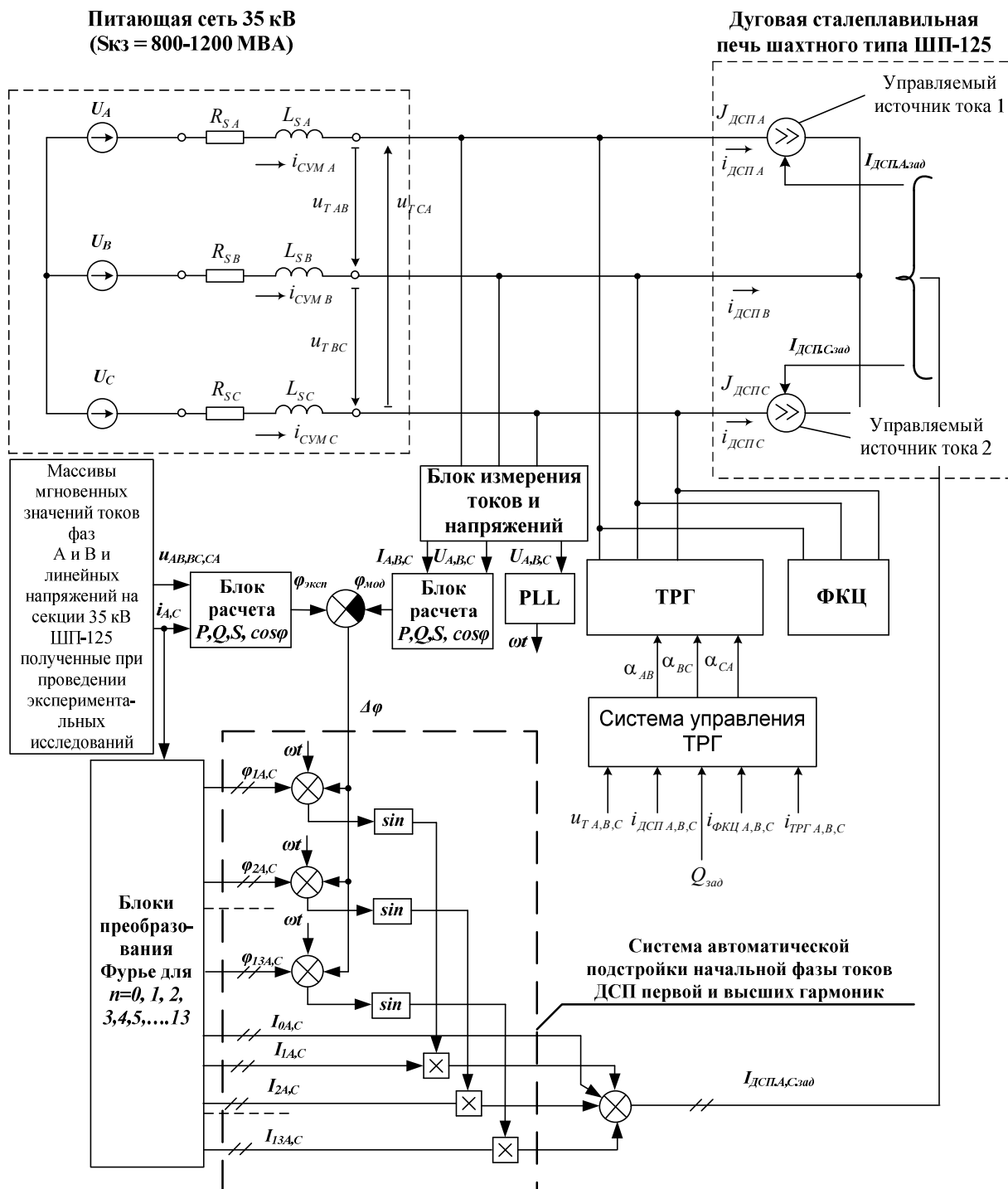


Рис. 3. Блок-схема детальной математической модели комплекса «ДСП-СТК» с учетом реальных мгновенных значений токов дуговой печи

Детальная математическая модель комплекса «ДСП-СТК» включает в себя: модель питающей сети 35 кВ; модель ТРГ с системой управления; модели фильтров высших гармоник, параметры которых определены на первом этапе моделирования; модель ДСП в виде управляемых источников тока, на которые подаются реальные мгновенные значения токов ДСП, полученные при проведении экспериментальных исследований на действующем объекте. Мгновенные значения записаны для начальной стадии расплавления металлошихты в ШП-125 (85 МВА) в первые 10 минут работы под током. Сигналы управления для источников тока формируются путем разложения экспериментальных массивов токов мгновенных значений на отдельные гармоники для восстановления реального тока нагрузки ДСП (см. рис. 3). Необходимо отметить, что прямое использование экспериментальных мгновенных значений тока ДСП в разработанной математической модели в качестве задающих сигналов для управления источниками тока является недопустимым из-за отсутствия синхронизации между изменяющимися начальными фазами токов и моделируемым напряжением сети. В данном случае для корректной работы управляемых источников тока необходимо использовать дополнительную систему автоматической подстройки начальной фазы, в которой осуществляется сравнение фактического угла $\varphi_{\text{эксп}}$, рассчитанного из выражения (5), со значением $\varphi_{\text{факт}}$, полученного при работе математической модели (6).

$$\varphi_{\text{эксп}} = \arccos(P_{\text{ДСП.сум}} / S_{\text{ДСП.сум}}), \quad (5)$$

где $P_{\text{ДСП.сум}}$, $S_{\text{ДСП.сум}}$ – экспериментальные значения активной и полной мощности на первичной стороне трансформатора.

$$\varphi_{\text{факт}} = \arccos(P_{\text{ДСП.сум.факт}} / S_{\text{ДСП.сум.факт}}), \quad (6)$$

где $P_{\text{ДСП.сум.факт}}$, $S_{\text{ДСП.сум.факт}}$ – рассчитанные на математической модели значения активной и полной мощности на первичной стороне трансформатора.

В модели предусмотрены блоки определения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U и коэффициентов n -х гармонических составляющих $K_{U(n)}$ в сети 35 кВ, которые используются при определении оптимального варианта конфигурации ФКЦ. Также в данной модели использован блок расчета кратковременной дозы фликера $P_{St10\text{мин}}$. При этом необходимо отметить, что доза фликера остается неизменной при различных конфигурациях фильтров, так как главным образом зависит от установленной мощности СТК и алгоритмов управления ТРГ [2]. В качестве примера расчет оптимального распределения суммарной мощности произведен для СТК 136,4 МВАр, функционирующего на АО «Сверсталь – Сортовой завод Балаково» (г. Балаково Саратовской области, Россия).

3. Выбор оптимальной конфигурации фильтрокомпенсирующих цепей СТК электродуговой печи

На основании разработанной математической модели проведены исследования по оптимальному распределению суммарной мощности ФКЦ по фильтрам высших гармоник. В процессе моделирования сформирован массив различных конфигураций фильтрокомпенсирующих цепей. Анализ полученных результатов моделирования показал, что оптимальным вариантом распределения мощности по фильтрам, с точки зрения стоимости элементов ФКЦ и потерь активной мощности, является сочетание $K_{Q\Phi2} = K_{Q\Phi3} = 0,2$; $K_{Q\Phi4} = 0,6$ ($Q_{\Phi2} = 27,28$ МВАр; $Q_{\Phi3} = 27,28$ МВАр; $Q_{\Phi4} = 81,84$ МВАр). При этом необходимо отметить, что при таком сочетании мощности ФКЦ наблюдаются наихудшие показатели коэффициента фильтрации и синусоидальности кривой напряжения. С точки зрения показателей фильтрации наиболее оптимальное распределение мощности по фильтрам высших гармоник достигается при сочетании $K_{Q\Phi2} = 0,6$; $K_{Q\Phi3} = K_{Q\Phi4} = 0,2$ ($Q_{\Phi2} = 81,84$ МВАр; $Q_{\Phi3} = 27,28$ МВАр; $Q_{\Phi4} = 27,28$ МВАр) (рис. 4). Однако при такой конфигурации фильтров наблюдается неоправданное завышение стоимости элементов ФКЦ и наибольшие потери активной мощности. Таким образом, для выбора оптимального варианта распределения суммарной мощности ФКЦ по отдельным фильтрам высших гармоник необходимо ввести многокритериальную целевую функцию, которая учитывает одновременно все основные критерии оптимальности:

$$C_{\text{ФКЦ}} \rightarrow \min \& \Delta P_{\text{ФКЦ}} \rightarrow \min \& k_{\text{фильтр}} \rightarrow \max,$$

$$\text{при } K_U < K_{U\text{пред.доп}}, K_{U(i)} < K_{U(i)\text{пред.доп}}, \quad (7)$$

где $C_{\text{ФКЦ}}$ – стоимость ФКЦ, млн руб.; $\Delta P_{\text{СТК}}$ – потери активной мощности в элементах ФКЦ, МВт; $k_{\text{фильтр}}$ – коэффициент фильтрации, о.е.; K_U – коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, %.

После введения системы ограничений (7) из 45 исследуемых вариантов распределения мощности СТК между фильтрами высших гармоник было получено 8 наиболее оптимальных сочетаний $Q_{\Phi2}$, $Q_{\Phi3}$ и $Q_{\Phi4}$ (табл. 2). Анализ оставшихся 8 вариантов показал, что с точки зрения показателей фильтрации наиболее оптимальным вариантом распределения мощности для СТК 136,4 МВАр является сочетание $K_{Q\Phi2} = K_{Q\Phi3} = 0,3$; $K_{Q\Phi4} = 0,4$ ($Q_{\Phi2} = 40,92$ МВАр; $Q_{\Phi3} = 40,92$ МВАр; $Q_{\Phi4} = 54,6$ МВАр) (вариант 7), поскольку в этом случае достигается наименьший коэффициент фильтрации, т.е. амплитуды параллельных резонансов 2-й, 3-й гармоник находятся на минимальном уровне, а также достигается наименьшее значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения. Однако необходимо отметить, что для всех 8 оптимальных вариантов распределения мощности по фильтрам

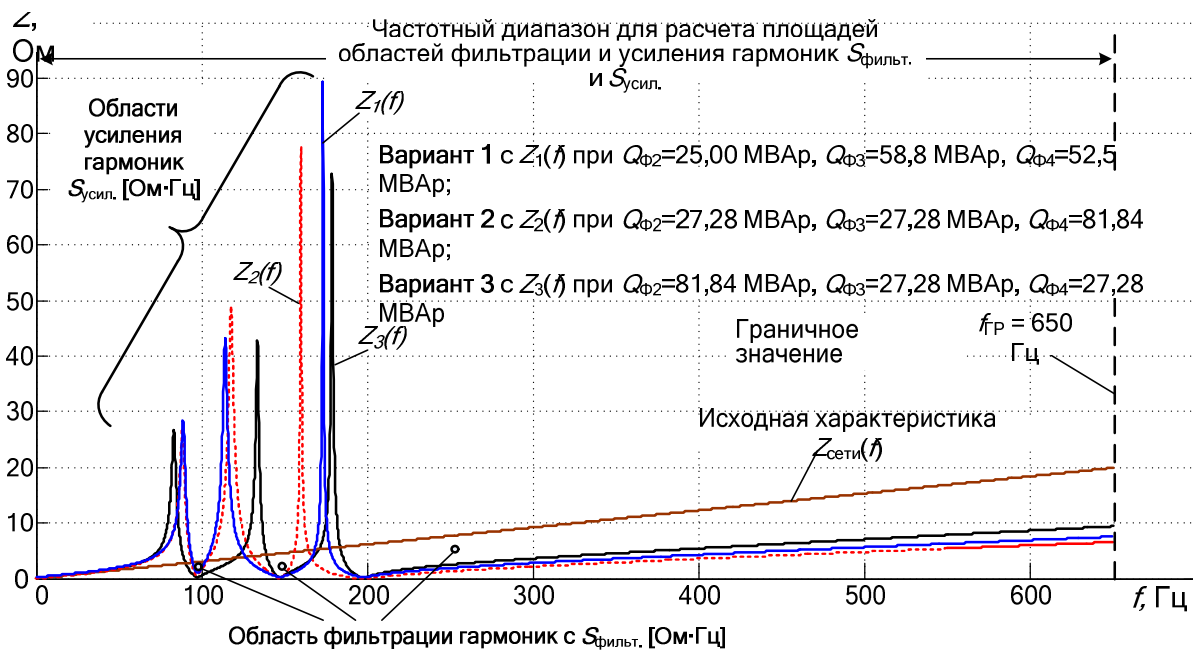


Рис. 4. Частотные характеристики питающей сети при различной конфигурации фильтров высших гармоник

Выбор оптимального варианта конфигурации ФКЦ СТК 136,4 МВАр

Таблица 2

№ варианта	$Q_{Ф2}$, МВАр	$Q_{Ф3}$, МВАр	$Q_{Ф4}$, МВАр	$K_{филт}$	$I_{maxФ2}$, А	$I_{maxФ3}$, А	$I_{maxФ4}$, А	ΔP , МВт	Стоимость ФКЦ $S_{ФКЦ}$, млн руб.	K_U , %	$P_{S10min.}$, о.е.
1	27,28	40,9	68,2	6,77	509,9	764,8	1274,6	0,178	17,58	4,705	1,10
2	27,28	47,7	61,4	6,94	509,9	892,2	1147,2	0,179	17,67	4,706	1,10
3	34,10	40,9	61,4	7,70	637,3	764,8	1147,2	0,198	17,98	4,492	1,10
4	34,10	47,7	54,6	7,71	637,3	892,2	1019,7	0,200	18,06	4,493	1,10
5	34,10	54,6	47,7	7,73	637,3	1019,7	892,2	0,202	18,14	4,412	1,10
6	40,92	34,1	61,4	7,96	764,8	637,3	1147,2	0,217	18,29	4,282	1,10
7	40,92	40,9	54,6	7,95	764,8	764,8	1019,7	0,219	18,37	4,281	1,10
8	40,92	47,7	47,7	7,95	764,78	892,24	892,24	0,221	18,45	4,299	1,10

высших гармоник максимальный суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, определенный на начальной стадии плавки металлошихты в ШП-125 (85 МВА), меньше предельно допустимого значения по ГОСТ 32144–2013 $K_U < K_{U_{пред.доп}}$. Таким образом, в тех случаях, когда значение $K_U < K_{U_{пред.доп}}$ (6 % для $U_{сети} = 35$ кВ) в качестве основных критериев оптимальности целесообразно использовать стоимость фильтрокомпенсирующих цепей и потери активной мощности в фильтрах высших гармоник. В связи с вышеизложенным наиболее оптимальным вариантом распределения мощности для СТК 136,4 МВАр является сочетание $K_{QФ2} = 0,2$; $K_{QФ3} = 0,3$; $K_{QФ4} = 0,5$ ($Q_{Ф2} = 27,28$ МВАр; $Q_{Ф3} = 40,9$ МВАр; $Q_{Ф4} = 68,2$ МВАр) (вариант 1).

Выводы

1. Оптимальное распределение мощности между фильтрами высших гармоник статического

тиристорного компенсатора электродуговой печи является важной задачей, от правильного решения которой зависят технико-экономические показатели работы компенсирующего устройства.

2. В настоящее время существует ряд методик выбора мощности отдельных фильтров высших гармоник, в которых используются разные критерии оптимальности, например коэффициент загрузки фильтра токами высших гармоник или минимизация параллельных резонансов токов, усиливающих интергармоники в напряжении сети. Недостатком данных методик является отсутствие комплексного подхода к выбору параметров фильтрокомпенсирующих цепей, предусматривающего использование многокритериальной целевой функции, включающей в себя такие показатели оптимальности, как: 1) стоимость элементов фильтров; 2) потери активной мощности в фильтрах высших гармоник; 3) коэффициент фильтрации высших гармоник.

3. На основании проведенных исследований разработана усовершенствованная методика распределения мощности между фильтрами высших гармоник. Методика предусматривает использование двух математических моделей: однофазной математической модели питающей сети и ФКЦ, на основании которой осуществляется расчет и анализ частотных характеристик системы «Сеть – ФКЦ» и осуществляется предварительный отбор оптимальных весовых коэффициентов мощности с учетом коэффициента фильтрации, активных потерь, стоимости конденсаторов и реакторов фильтров, а также 2-й детальной математической модели комплекса «ДСП-СТК», учитывающей реальные мгновенные значения токов ДСП, на основании которой выполняется дополнительная проверка полученных вариантов с точки зрения обеспечения наименьшего суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения.

4. Разработанная методика позволяет проводить более точный расчет параметров ФКЦ СТК, позволяющий достичь наименьшей стоимости ФКЦ при оптимальных коэффициентах фильтрации, активных потерях и суммарном коэффициенте гармонических составляющих напряжения.

5. Установлена закономерность между коэффициентом фильтрации и мощности фильтра 2-й гармоники. При максимальном весовом коэффициенте фильтра 2-й гармоники достигается максимальное значение коэффициента фильтрации из-за значительного уменьшения пиков параллельных резонансов, однако при этом происходит необоснованное завышение установленной мощности реактивных элементов фильтра 2-й гармоники. По этой причине коэффициент фильтрации должен использоваться совместно с другими критериями оптимальности.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-3230.2018.8).

Литература

1. Николаев, А.А. Исследование режимов работы дуговых сталеплавильных печей в комплексе со статическими тиристорными компенсаторами реактивной мощности. Часть 1 / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, И.А. Якимов // *Электротехнология*. – 2014. – № 5. – С. 15–22.

2. Николаев, А.А. Повышение эффективности работы электротехнического комплекса «дуговая сталеплавильная печь – статический тиристорный компенсатор»: моногр. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2017. – 318 с.

3. Николаев, А.А. Повышение эффективности работы дуговых сталеплавильных печей и установок ковши-печь за счет применения усовершенствованных алгоритмов управления электрическими

режимами: моногр. – Магнитогорск. Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. – 161 с.

4. Экспериментальное исследование гармонического состава токов дуг для дуговых сталеплавильных печей различной мощности / А.А. Николаев, Ж.Ж. Руссо, В. Сцымански, П.Г. Тулунов // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2016. – Т. 14, № 3. – С. 106–120. DOI: 10.18503/1995-2732-2016-14-3-106-120

5. Hingorani, N.G. *Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems* / N.G. Hingorani, L. Gyugyi // *IEEE Press book*. – 2000. – 429 p.

6. Kashani, M.G. *SVC and STATCOM Application in Electric Arc Furnace Efficiency Improvement* / M.G. Kashani, S. Babaei, S. Bhattacharya // *Proceedings of the 4th IEEE International Symposium "Power Electronics for Distributed Generation Systems" (PEDG)*. – Rogers, AR, USA, 2013. – P. 1–7. DOI: 10.1109/PEDG.2013.6785641

7. Morello, S. *Installation, Startup and Performance of a Static Var Compensator for an Electric Arc Furnace Upgrade* / S. Morello, T.J. Dionise, T.L. Mank // *Proceedings of the Industry Applications Society Annual Meeting*. – Addison, TX, USA. IEEE, 2015. – P. 1–9. DOI: 10.1109/IAS.2015.7356881

8. Кочкин, В.И. *Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий* / В.И. Кочкин, О.П. Нечаев. – М.: НЦ ЭНАС, 2002. – 247 с.

9. *Reduction of SVC Capacity by Flicker Control Using Parallel Band-Pass Filters* / N. Gibo, K. Yukihiro, K. Deno, Y. Nagasaka // *Proceedings of the 14th International Conference "Harmonics and Quality of Power" (ICHQP)*. – Bergamo, Italy, 2010. – P. 1–6. DOI: 10.1109/ICHQP.2010.5625333

10. Gildong, K. *Optimal Capacity of SVC to Compensate Flicker induced by Electric Arc Furnace* / K. Gildong, H. Lee // *Proceedings of the International Conference "Information and Multimedia Technology"*. – Jeju Island, South Korea, 2009. – P. 43–46. DOI: 10.1109/ICIMT.2009.36

11. *Reactive Compensation for AC Electric Arc Furnace Considering Power Quality Constraints* / X.H. Zhu, H.K. Chen, P. Hu, R.N. Chen // *Proceedings of the 17th International Conference "Harmonics and Quality of Power" (ICHQP)*. – Belo Horizonte, Brazil, 2016. – P. 919–924. DOI: 10.1109/ICHQP.2016.7783453

12. Фомин, А.В. *Анализ методик обоснования мощности статического тиристорного компенсатора для сталеплавильных печей* / А.В. Фомин // *Известия Тульского государственного технического университета. Технические науки*. – 2010. – Вып. 4, ч. 2. – С. 35–46.

13. Тропин, В.В. *Анализ и синтез быстродействующих систем компенсации реактивной мощности в электрических сетях с резкопеременными*

нагрузками методом частотных характеристик: дис. ... д-ра техн. наук / В.В. Тропин. – Краснодар, 1998. – 523 с.

14. Фомин, А.В. Обоснование рациональных параметров устройств поперечной компенсации электротехнических систем электротехнологий: дис. ... канд. техн. наук / А.В. Фомин. – Тула, 2009. – 161 с.

15. Abdel-Rahman, M.H. *New Static Var Compensator Control Strategy and Coordination with Under-Load Tap Changer* / M.H. Abdel-Rahman, F.M. Youssef, A.A. Saber // *IEEE Transaction on Power Delivery*. – 2006. – Vol. 21, no. 3. – P. 1630–1635. DOI: 10.1109/TPWRD.2005.858814

16. *Coordination of an SVC with a ULTC Reserving Compensation Margin for Emergency Control* /

K.M. Son, K.S. Moon, S.K. Lee, J.K. Park // *IEEE Transaction on Power Delivery*. – 2000. – Vol. 15, no. 4. – P. 1193–1198. DOI: 10.1109/61.891502.

17. Выбор мощности статических тиристорных компенсаторов для сверхмощных дуговых сталеплавильных печей / А.А. Николаев, П.Ю. Полозюк, Т.Е. Пелагеин, Г.П. Корнилов // *Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр.* – 2011. – Вып. 19. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. ун-та им. Г.И. Носова. – С. 80–84.

18. Обоснование выбора мощности фильтрокомпенсирующего устройства дуговой сталеплавильной печи / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, А.С. Зайцев и др. // *Главный энергетик*. – 2015. – № 8. – С. 49–56.

Николаев Александр Аркадьевич, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматизированный электропривод и мехатроника», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; aa.nikolaev@magtu.ru.

Корнилов Геннадий Петрович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; korn_mgn@mail.ru.

Денисевич Александр Сергеевич, аспирант кафедры «Автоматизированный электропривод и мехатроника», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; denisevich993@mail.ru.

Поступила в редакцию 28 ноября 2018 г.

DOI: 10.14529/power180410

DEVELOPING OF A NEW CALCULATION METHOD FOR HARMONIC FILTERS PARAMETERS OF ARC FURNACE STATIC VAR COMPENSATOR

A.A. Nikolaev, aa.nikolaev@magtu.ru,
G.P. Kornilov, korn_mgn@mail.ru,
A.S. Denisevich, denisevich993@mail.ru

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

Relevance. A lot of Russian as well as foreign metallurgical feature electrical steel-making complexes based on electric arc furnaces (EAF) and ladle furnaces (LF). These steel-making units generate high-power electrical load, have non-linear volt-ampere characteristics and leaping unbalanced load variation. For this reason, an operating EAF aggravates power quality and causes an increase in the reactive power factor on the incoming feeders of the main electrical substations. To provide for the appropriate power quality and voltage stabilization on the primary side of the furnace transformer, the additional reactive power compensation devices are used. More than 85% of reactive power compensators for EAF and LF are currently released as static var compensators consisting of a thyristor-controlled reactor (TCR) and filter circuits (FC). The analysis of the rated parameters of SVC produced by different companies shows that there is no universal selection method for the harmonic filters configuration. In that regard, a pressing task is to develop a complex approach to determine an optimum configuration of harmonic filters, provided that its their rated power is known. Research objective: developing the improved method used to select the parameters of filter circuits of SVC for electric arc furnace, accounting for different relevance criteria such as: the cost of FCs, active power losses in harmonic

filters, filtration coefficient, and the total harmonic distortion of voltage. Methods: experimental arrays of electrical parameters saved on existing electrotechnical complexes “EAF-SVC” and the methods of mathematical modeling of SVC and EAF. Novelty: the suggested developed method of SVC’s filter circuits parameters selection is original as it features the distribution of the total reactive power using the group optimal criteria, which provides for the best technical and economical indexes of FC, as well as accounting for the peculiar features of a certain steel-making unit and its power supply system. This method is also more accurate in terms of analysis of the electrical regimes of FC as it uses real instantaneous current of EAFs of different classes and power. Research outcomes: 1) the executed analysis of parameters of existing SVC produced by different companies; 2) the existing methods of distribution of total reactive power between harmonic filters have been analyzed; 3) the improved mathematical model of complex “EAF-SVC” allowing for the detailed studies of FC operation modes taking into account the real EAF’s current been mode; 4) the patterns of variation of filtration coefficient for different variants of distribution of total reactive power between harmonic filters have been determined on the basis of mathematical model; 5) the improved method of calculation of SVC’s FC providing for the optimum distribution of reactive power between the harmonics filters taking into account a group of different optimal criteria has been developed. Practical significance: the results have significant theoretical importance for electrical engineering of arc furnaces and may be employed in the calculation of static var compensators in power supply systems of steel-making complexes.

Keywords: electric arc furnace, ladle furnace, static var compensator, filter circuits, thyristor-controlled reactor.

References

1. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Yakimov I.A. [Study of Operating Modes of Electric arc Furnaces Together with Static var Compensators. Part 1]. *Elektrometallurgiya* [Electrometallurgy], 2014, no. 5, pp. 15–22. (in Russ.)
2. Nikolaev A.A. *Povyshenie effektivnosti raboty elektrotehnicheskogo kompleksa “dugovaya staleplavil'naya pech' – staticheskiy tiristornyy kompensator”*: monografiya [Improving the Efficiency of Work of Electrotechnical Complex “Electric arc Furnace – Static Var Compensator”: Monograph]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2017. 318 p.
3. Nikolaev A.A. *Povyshenie effektivnosti raboty dugovykh staleplavil'nykh pecheyi ustanovok kovsh-pech' za schet primeneniya usovershenstvovannykh algoritmov upravleniya elektricheskimi rezhimami: monografiya* [Improving the Efficiency of Work of Electric Arc Furnaces and Ladle Furnaces by Using of More Effective Methods of Electrical Regimes' Control: Monograph]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2015. 161 p.
4. Nikolayev A.A., Russo Zh.Zh., Stsymansky V., Tulupov P.G. [An Experimental Study of Electric Arc Current Harmonics in Electric Arc Furnaces with Different Power Characteristics]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2016, no. 3, pp. 106–120. (in Russ.)
5. Hingorani N.G., Gyugyi L. *Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. IEEE Press Book, 2000. 429 p.
6. Kashani M.G., Babaei S., Bhattacharya S. SVC and STATCOM Application in Electric Arc Furnace Efficiency Improvement. *Proceedings of the 4th IEEE International Symposium “Power Electronics for Distributed Generation Systems” (PEDG)*. Rogers, AR, USA, 2013, pp. 1–7. DOI: 10.1109/PEDG.2013.6785641
7. Morello S., Dionise T.J., Mank T.L. Installation, Startup and Performance of a Static Var Compensator for an Electric Arc Furnace Upgrade. *Proceedings of the Industry Applications Society Annual Meeting*. Addison, TX, USA. IEEE, 2015, pp. 1–9. DOI: 10.1109/IAS.2015.7356881
8. Kochkin V.I., Nechaev O.P. *Primenenie staticheskikh kompensatorov reaktivnoy moshhnosti v elektricheskikh setyakh energosistem i predpriyatiy* [Implementation of Static Var Compensators in Electrical Grids of Electrical Power Systems and Industrial Enterprises]. Moscow, SC ENAS Publ., 2002. 247 p.
9. Gibo N., Yukihiro K., Deno K., Nagasaka Y. Reduction of SVC Capacity by Flicker Control Using Parallel Band-Pass Filters. *Proceedings of the 14th International Conference “Harmonics and Quality of Power” (ICHQP)*. Bergamo. Italy, 2010, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICHQP.2010.5625333
10. Gildong K., Lee H. Optimal Capacity of SVC to Compensate Flicker induced by Electric Arc Furnace. *Proceedings of the International Conference “Information and Multimedia Technology”*. Jeju Island, South Korea, 2009, pp. 43–46. DOI: 10.1109/ICIMT.2009.36
11. Zhu X.H., Chen H.K., Hu P., Chen R.N. Reactive Compensation for AC Electric Arc Furnace Considering Power Quality Constraints. *Proceedings of the 17th International Conference “Harmonics and Quality of Power” (ICHQP)*. Belo Horizonte. Brazil, 2016, pp. 919–924. DOI: 10.1109/ICHQP.2016.7783453
12. Fomin A.V. [The Analysis of Methods of Power Justification of Static Var Compensator for Electric Arc Furnaces]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. [Izvestiya of the Tula State University. Technical Sciences], 2010, iss. 4, part. 2, pp. 35–46. (in Russ.)

13. Tropin V.V. *Analiz i sintez bystrodeystvuyushchikh sistem kompensatsii reaktivnoy moshchnosti v elektricheskikh setyakh s rezkoperemennymi nagruzkami metodom chastotnykh kharakteristik*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Analysis and Synthesis of Fast-Acting Reactive Power Compensation Systems. Doct. Sci. Diss.], Krasnodar, 1998. 523 p.

14. Fomin A.V. *Obosnovanie racional'nykh parametrov ustroystv poperechnoy kompensatsii elektrotekhnicheskikh sistem elektrotekhnologij*. Diss. kand. tekhn. nauk. [The Justification of Rational Parameters of Shunt Compensating Devices for Electrotechnical Systems. Cand. Sci. Diss.]. Tula, 2009. 161 p.

15. Abdel-Rahman M.H., Youssef F.M., Saber A.A. New Static Var Compensator Control Strategy and Coordination with Under-Load Tap Changer. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 2006, vol. 21, no. 3, pp. 1630–1635. DOI: 10.1109/TPWRD.2005.858814

16. Son K.M., Moon K.S., Lee S.K., Park J.K. Coordination of an SVC with a ULTC Reserving Compensation Margin for Emergency Control. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 2000, vol. 15, no. 4. pp. 1193–1198. DOI: 10.1109/61.891502

17. Nikolayev A.A., Polozyuk P.Yu., Pelagein T.E., Kornilov G.P. [Power Choosing of Static Var Compensators for Ultra High-Power Electric Arc Furnaces]. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2011, vol. 19, pp. 80–84. (in Russ.)

18. Nikolayev A.A., Kornilov G.P., Zaytsev A.S., Skakun S.V., Urmanova F.F. [The Justification of Choosing of Power of Filtering and Compensation Device for Electric Arc Furnace]. *Glavnyy energetik* [Chief Electrician], 2015, no. 8, pp. 49–56. (in Russ.)

Received 28 November 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Николаев, А.А. Разработка усовершенствованной методики расчета параметров фильтрокомпенсирующих цепей статического тиристорного компенсатора электродуговой печи / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, А.С. Денисевич // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 4. – С. 89–100. DOI: 10.14529/power180410

FOR CITATION

Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Denisevich A.S. Developing of a New Calculation Method for Harmonic Filters Parameters of Arc Furnace Static Var Compensator. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 89–100. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180410