Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2023. Т. 43. №2. С. 126-140. ISSN 2079-6641

ФИЗИКА

https://doi.org/10.26117/2079-6641-2023-43-2-126-140

Научная статья

Полный текст на русском языке

УДК 621.311

Компенсация реактивной мощности в руднотермическом производстве

А. А. Махошев[1*], О. А. Гаврина[1], Р. В. Клюев[2]

[1] Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), 362021, Владикавказ, ул. Николаева, 44, Россия

[2] Московский политехнический университет, 107023, г. Москва, ул. Б. Семеновская, 38, Россия

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы компенсации реактивной мощности при работе дуговых сталеплавильных печей (ДСП) при руднотермическом производстве. Приведены значения коэффициентов несинусоидальности напряжения для различных режимов плавки ДСП. Были осуществлены комплексные исследования, представляющие анализ эффективности снижения искажения напряжения силовыми фильтрами, которые могут быть представлены без динамической группы, и сравнение полученных данных с результатами использования фильтров 3-й и 5-й гармоник, входящих в состав компенсаторов реактивной мощности. Результаты исследований искажения формы кривой напряжения при работе ДСП свидетельствуют о том, что при отсутствии устройств динамической компенсации требования государственного стандарта по качеству электроэнергии обеспечиваются без включения фильтров. Фильтры необходимы для ограничения потребления при исключении возможности резонанса в параллельно включенных конденсаторах и индуктивных сопротивлениях связи с источником. По итогам выполненных расчетов видно, что установив фильтр 3-ей гармоники на шинах ЗРУ-35 кВ достигнуты существенные результаты, а именно обеспечена минимизация размахов напряжения (до $0,78\%$) и одновременно решен вопрос компенсации реактивной мощности ($\cos\varphi = 0,95$) при минимальных удельных затратах.

Ключевые слова: компенсация, реактивная мощность, дуговая сталеплавильная печь, несинусоидальность напряжения, фильтр гармоник, статический компенсатор.

Получение: 29.05.2023; Исправление: 25.06.2023; Принятие: 26.06.2023; Публикация онлайн: 07.07.2023

Для цитирования. Махошев А. А., Гаврина О. А., Клюев Р. В. Компенсация реактивной мощности в руднотермическом производстве // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.* 2023. Т. 43. № 2. С. 126-140. EDN:VQAYYO. https://doi.org/10.26117/2079-6641-2023-43-2-126-140.

Финансирование. Исследование выполнялось без финансовой поддержки фондов

Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

[*]**Корреспонденция:** E-mail: salima@list.ru, Gavrina-Oksana@yandex.ru, kluev-roman@rambler.ru

Контент публикуется на условиях Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Махошев А. А., Гаврина О. А., Клюев Р. В., 2023

© ИКИР ДВО РАН, 2023 (оригинал-макет, дизайн, составление)

Vestnik KRAUNC. Fiz.-Mat. nauki. 2023. vol. 43. no. 2. P. 126-140. ISSN 2079-6641

PHYSICS

https://doi.org/10.26117/2079-6641-2023-43-2-126-140

Research Article

Full text in Russian

MSC 94A12

Reactive Power Compensation in Thermal Ore Production

***A. A. Mahoshev*[1*], *O. A. Gavrina*[1], *R. V. Klyuev*[2]**

[1] The North Caucasian Institute of mining and metallurgy (State Technological University), 44, Nikolaeva, Vladikavkaz, 362011, Russia

[2] Moscow Polytechnic University, 38, B. Semenovskaya, Moscow, 107023, Russia

Abstract. The paper deals with the issues of reactive power compensation during the operation of arc steel-smelting furnaces (EAF) in ore-thermal production. The values of voltage non-sinusoidality coefficients for various EAF melting modes are given. Comprehensive studies were carried out, presenting an analysis of the effectiveness of reducing voltage distortion by power filters, which can be presented without a dynamic group, and comparing the data obtained with the results of using filters of the 3rd and 5th harmonics, which are part of reactive power compensators. The results of studies of the distortion of the shape of the voltage curve during the operation of the EAF indicate that in the absence of dynamic compensation devices, the requirements of the state standard for the quality of electricity are provided without turning on filters. Filters are needed to limit consumption while eliminating the possibility of resonance in parallel-connected capacitors and source-coupled inductive reactances. According to the results of the performed calculations, it can be seen that by installing the 3rd harmonic filter on the ZRU-35 kV buses, significant results were achieved, namely, the voltage swings were minimized (up to 0.78%) and the issue of reactive power compensation was simultaneously resolved ($\cos\varphi = 0.95$) at the lowest unit cost.

Key words: compensation, reactive power, steel-smelting arc furnace, non-sinusoidal voltage, harmonic filter, static compensator.

Received: 29.05.2023; Revised: 25.06.2023; Accepted: 26.06.2023; First online: 07.07.2023

For citation. Mahoshev A. A., Gavrina O. A., Klyuev R. V. Reactive power compensation in thermal ore production. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2023, **43**: 2, 126-140. EDN:VQAYYO. https://doi.org/10.26117/2079-6641-2023-43-2-126-140.

Funding. The authors declare that there are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Competing interests. There are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

[*]**Correspondence:** E-mail: salima@list.ru, Gavrina-Oksana@yandex.ru, kluev-roman@rambler.ru

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Mahoshev A. A., Gavrina O. A., Klyuev R. V., 2023

© Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, 2023 (original layout, design, compilation)

Введение

Одними из наиболее энергоемких потребителей при руднотермическом производстве являются дуговые сталеплавильные печи (ДСП). Поэтому для них актуальными и важными является решение комплекса сложных электротехнических задач. К ним можно отнести следующие: повышение надежности и экономичности работы как собственно печей, так и системы их электроснабжения, обеспечение достаточной степени стабилизации тока [1, 2] и других параметров электрического режима работы дуговых печей, снижение колебаний напряжения в электрических сетях. Проблема электромагнитной совместимости при работе этих печей, особенно в части колебаний напряжения, становится более острой.

Работа ДСП сопровождается рядом явлений, которые могут оказать отрицательное влияние на работу других потребителей, имеющих с печами общую точку присоединения.

Применение компенсирующих устройств в системах электроснабжения [3, 4] требует учета особенностей дуговых сталеплавильных печей как потребителя электроэнергии, а именно цикличности нагрузки, ступенчатого потребления мощности в отдельные периоды плавки, резко переменного и несимметричного характера нагрузки в период расплавления.

В таблице 1 приведены значения коэффициентов несинусоидальности ($k_{нс}$, %) для различных режимов плавки в ДСП.

Таблица 1

Содержание высших гармоник тока дуговой печи
[The content of higher harmonics of the arc furnace current]

Режим плавки	Процентное содержание тока гармоник с номером												$k_{нс}$%,
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
Начало	1,79	10	4,17	2,96	2,5	1,6	1,2	0,6	0,41	0,58	0,34	0,33	11,4
расплава	1,35	3,17	1	0,6	0,73	0,48	0,18	0,16	0,15	0,14	0,06	0,06	4,22
Середина	6	6,9	3,28	2,84	1,23	1	0,46	0,31	0,22	0,2	0,1	0,13	10,3
расплава	1,85	2,77	0,9	0,67	0,32	0,38	0,18	0,07	0,07	0,06	0,04	0,03	3,55
Рафиниро	4,62	8,6	1,58	2,6	0,65	0,51	0,33	0,48	0,22	0,42	0,11	0,17	10,3
-вание	1,33	2,1	0,44	0,5	0,22	0,1	0,1	0,13	0,07	0,15	0,05	0,06	2,6

В числителе приведены максимальные, а в знаменателе среднее значение высших гармоник тока, %.

Ввиду отсутствия осциллографических данным по объекту проверка размаха эквивалентного колебания в сетях с ДСП рассчитывается для группы одинаковых печей как:

$$V_t = \frac{\sqrt[4]{4} \cdot S_{п.т}}{S_{к.з}} \cdot 100\% \leq 1\%, \quad (1)$$

где $S_{п.т}$ – номинальная мощность печного трансформатора, МВА, $S_{к.з}$ – мощность КЗ в той точке сети, в для которой определяется значение колебаний напряжения (шины закрытого распределительного устройства).

Выражение (1) позволяет получить приемлемые результаты с интегральной вероятностью 95%.

Подставив значения $S_{п.т} = 18$ МВА; $S_{к.з} = 1389$ МВА для цеха металлургического комбината, в котором установлены ДСП, получим:

$$V_t = \frac{\sqrt[4]{4} \cdot 18}{1389} \cdot 100\% = 1,83\%.$$

Так как приведенные значения коэффициента несинусоидальности напряжения и колебаний напряжения превышают нормированные ГОСТ значения [5, 6], рекомендуется подключение силовых фильтров, которые снижают значения токов и напряжений высших гармоник в сетях энергосистемы и предприятия и одновременно обеспечивают компенсацию реактивной мощности КРМ для основной (1-й) гармоники напряжения.

Постановка задачи компенсации реактивной мощности

Электротехнологические установки характеризуются неравномерным потреблением реактивной мощности в течение суток, а также ее колебаниями, вызывающими колебания напряжения. Вследствие неравномерности потребления мощности по фазам и нелинейной вольт-амперной характеристики нагрузки они вызывают несимметрию и несинусоидальность питающего напряжения [7, 8].

Применительно к ДСП следует отметить, что наибольшую мощность печи потребляют в период расплавления. Этот режим характеризуется частыми эксплуатационными короткими замыканиями (КЗ), значительным искажением тока нагрузки и низким коэффициентом мощности.

В общем виде реактивную печную нагрузку можно выразить как:

$$Q(t) = Q_{ср}(t) + \delta Q(t), \qquad (2)$$

$Q_{ср}(t)$ – постоянная составляющая (средняя мощность);$\delta Q(t)$ – переменная составляющая.

При компенсации колебаний реактивной мощности группы ДСП необходимо учитывать, что суммарная печная нагрузка в реальных условиях имеет вероятностный характер. Наложение периодов расплавления при работе группы печей подчинено биноминальному распределению, а распределение длительностей этих наложений происходит по экспоненциальному закону.

В момент эксплуатационных КЗ происходят наброcы реактивной мощности, а также значительные спады и колебания напряжения, вызывающие фликер, помехи работы других потребителей [9, 10].

Колебания напряжения, возникающие при резкопеременных нагрузках, практически пропорциональны колебаниям реактивной мощности. Поэтому для

устранения колебаний напряжения необходимо применение компенсирующих устройств, параметры которых при резкопеременных графиках должны удовлетворять следующим требованиям: обладать быстродействием, соответствующим изменению реактивной мощности исходного графика нагрузки, иметь достаточную располагаемую реактивную мощность для компенсации переменной составляющей (компенсация колебания напряжения) и постоянной составляющей (улучшение коэффициента мощности) потребляемой реактивной мощности. При резкой несимметрии напряжения, например, при работе дуговых печей, необходимо пофазное управление компенсирующими устройствами [11, 12].

Результаты анализа несинусоидальности напряжения

Были проведены исследования, представляющие анализ эффективности снижения искажения напряжения силовыми фильтрами (Ф), которые могут быть представлены без динамической группы, и сравнение полученных данных с результатами использования фильтров 3-й и 5-й гармоник, входящих в состав компенсаторов реактивной мощности (ТКРМ).

На рис. 1 представлена схема замещения для расчета распределения токов высших гармоник в питающей сети и компенсирующих установках (фильтрах) без учета шунтирующего эффекта нагрузки системы электроснабжения.

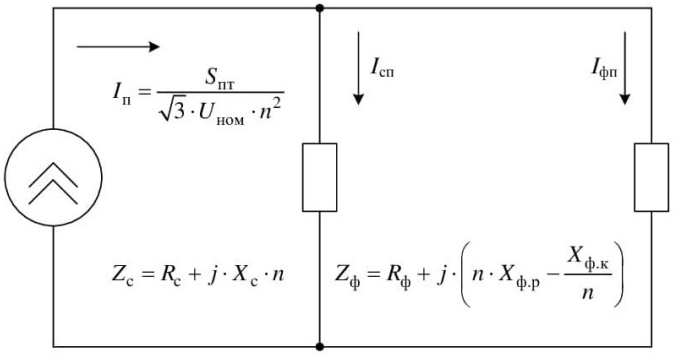

Рис. 1. Схема замещения системы электроснабжения для расчета высших гармоник тока

Figure 1. Equivalent circuit of the power supply system for the calculation of higher current harmonics

Токи высших гармоник, протекающие по линии связи с питающим источником ($I_{\text{сп}}$), могут быть определены по следующим выражениям:

$$I_{\text{сп}} = I_{\text{п}} \cdot K_{\text{п}} = I_{\text{п}} \cdot \frac{Z_{\text{фп}}}{Z_{\text{сп}} + Z_{\text{фп}}}; \quad (3)$$

$$I_{сп} = I_{п} \cdot \frac{\sqrt{R_{ф}^2 + \left(n \cdot X_{ф.р} - \frac{X_{ф.к}}{n}\right)}}{\sqrt{\left(R_{ф} + R_{с}\right)^2 + \left[n\left(X_{ф.р} + X_{с}\right) - \frac{X_{ф.к}}{n}\right]^2}}; \tag{4}$$

$$I_{фп} = I_{п} \cdot \frac{Z_{сп}}{Z_{сп} + Z_{фп}} = I_{п} \cdot \frac{\sqrt{R_{с}^2 + (X_{с} \cdot n)^2}}{\sqrt{\left(R_{ф} + R_{с}\right)^2 + \left[n\left(X_{ф.р} + X_{ф.р}\right) - \frac{X_{ф.к}}{n}\right]^2}}, \tag{5}$$

где $R_{ф}$, $_{ф.р}$, $_{ф.к}$ – активное, индуктивное и емкостное сопротивления фильтра 1-й гармоники тока; $R_{с}$, $X_{с}$ – активное и индуктивное сопротивления питающей энергосистемы; $K_{п}$ – коэффициент, характеризующий кратность изменения высших гармонических через питающую линию энергосистемы при включении фильтра.

При токах резонансной частоты последовательного контура ветвь с силовым фильтром имеет активный характер ($Z_{ф} = R_{ф}$), при токах с частотой, превышающей резонансную, – емкостный, а при токах с частотой ниже резонансной – индуктивный характер.

При выполнении условия:

$$\frac{n \cdot X_{с}}{R_{с}^2 + (X_{с} \cdot n)^2} = \frac{\frac{X_{ф.к}}{n} - n \cdot X_{ф.р}}{R_{ф}^2 + \left(\frac{X_{ф.р}}{n} - n \cdot X_{ф.р}\right)^2} \tag{6}$$

возникает резонанс в параллельном контуре (емкость фильтра включена параллельно индуктивности источника питания), сопровождающийся многократным увеличением токов $I_{фп}$, $I_{сп}$, перегрузкой элементов фильтра и значительным увеличением коэффициентов несинусоидальности и гармонических составляющих питающего напряжения.

При включении фильтра коэффициент гармонических составляющих напряжения питания равен:

$$K_{U(n)}^{ф} = \frac{\sqrt[4]{N} \cdot 100 \cdot K_{п} \cdot S_{п.т}}{n \cdot S_{к.з}}, \tag{7}$$

Коэффициент искажения напряжения (коэффициент несинусоидальности):

$$K_{U}^{ф} = \frac{100 \cdot \sqrt[4]{N} \cdot S_{п.т}}{n \cdot S_{к.з}} \sqrt{\sum_{n=2}^{7} \left(\frac{K_{п}}{n}\right)^2}. \tag{8}$$

Эффективность снижения фильтром искажения питающего напряжения может быть оценена с помощью коэффициента эффективности фильтрации, который равен отношению коэффициентов несинусоидальности напряжения в узле после установки в эту точку фильтра и до нее:

$$K_{э} = \sqrt{\sum_{n=2}^{7} \left(\frac{K_{п}}{n}\right)^2} \Bigg/ \sqrt{\sum_{n=2}^{7} \frac{1}{n^2}}. \tag{9}$$

Токовая нагрузка фильтра определяется по выражению:

$$I = \sqrt{\left(\frac{Q_{ф.нор}}{\sqrt{3}\cdot U_{ном}}\right)^2 + \sum_{n=2}^{7} I_ф^2(n)} \approx \frac{1}{\sqrt{3}\cdot U_{ном}} \sqrt{Q_{ф.ном}^2 + \left(\frac{1,1\cdot S_{п.т}}{n_0^2}\right)^2} \le I_{ф.ном}, \quad (10)$$

где n_0 – порядковый номер резонансной гармоники.

Данные расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты работы фильтров [Filter results]

Тип фильтра		$S_{кз}$, МВА	Значения гармонических составляющих напряжения питания $K^{ф}_{U(n)}$ при включении фильтров гармоник						$K_э$
			2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й	
Ф5-2400 ($Q_г = 4,0$)		500	1,098	1,35	5,5	0,053	0,39	0,51	2,4
		1000	1,046	1,15	1,7	1,107	0,564	0,675	1,1
		1500	1,022	1,07	1,26	0,21	0,72	0,8	1
В составе ТКРМ	Ф5 ($Q_г$ = 4,37 МВАр)	500	1,12	1,47	21,8	0,03	0,34	0,46	9
		1000	1,05	1,19	2	0,064	0,5	0,63	1,2
		1500	1,02	1,086	1,33	0,12	0,68	0,77	1
	Ф5 ($Q_г$ = 6,45 МВАр)	500	1,22	2,14	1,45	0,018	0,24	0,34	1,47
		1000	1,1	1,36	6,13	0,036	0,39	0,5	2,68
		1500	1,04	1,15	1,72	0,07	0,56	0,67	1,11
	Ф5 ($Q_г$ = 7,95 МВАр)	500	1,34	3,96	0,72	0,003	0,18	0,27	2,3
		1000	1,14	1,59	5,3	0,017	0,316	0,42	2,4
		1500	1,06	1,23	2,45	0,003	0,48	0,59	1,34
	Ф5 ($Q_г$ = 10,7 МВАр)	500	1,65	5,69	0,36	0,005	0,13	0,19	3,2
		1000	1,24	2,42	1,156	0,011	0,23	0,32	1,5
		1500	1,1	1,41	1,34	0,22	0,37	0,48	5,5
	Ф3 ($Q_г$ = 4,31 МВАр)	500	1,15	0,06	0,72	0,79	0,81	0,83	0,7
		1000	1,07	0,12	0,84	0,88	0,89	0,9	0,78
		1500	1,03	0,23	0,9	0,93	0,94	0,95	0,8
	Ф3 ($Q_г$ = 8,25 МВАр)	500	1,4	0,026	0,52	0,61	0,65	0,67	0,8
		1000	1,18	0,053	0,68	0,76	0,79	0,8	0,7
		1500	1,08	0,11	0,81	0,86	0,88	0,89	0,7

Анализ этих данных свидетельствует о недопустимости использования фильтров 5-й гармоники без фильтров 3-й в сетях с ДСП. В этом случае для

гармонических, частота которых ниже резонансной, происходит не фильтрация, а усиление искажения синусоидальности напряжения. Этот эффект ($K_э > 1$) сохраняется во всем диапазоне возможных S_K для всех мощностей фильтров 5-й гармоники. Фильтры 3-й гармоники снижают искажение коэффициентов несинусоидальности ($K_э = 0,77 - 0,85$).

Компенсация реактивной мощности

Рассмотрим подробнее быстродействующий статический компенсатор (БСК). Компенсатор состоит из одного статического звена и 2-ух динамических звеньев (рис. 2).

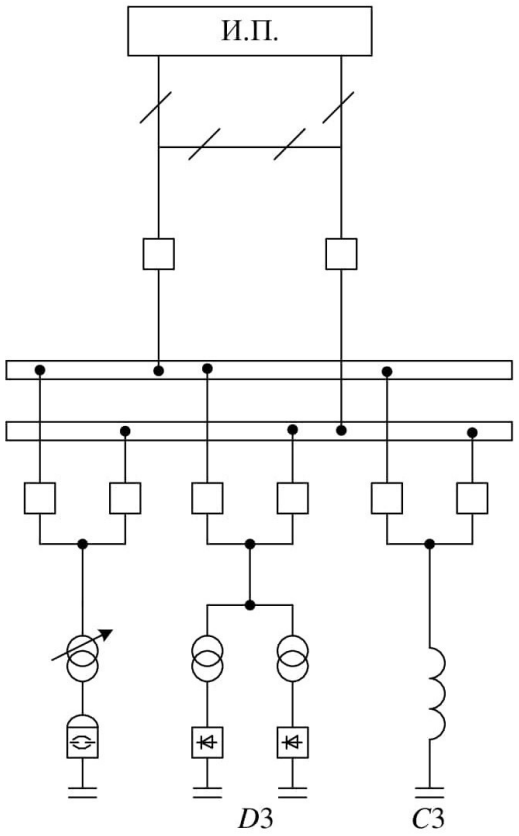

Рис. 2. Схема питания ДСП прямой компенсации
Figure 2. EAF direct compensation power circuit

Статическое звено выполняет функции: компенсация постоянной составляющей реактивной мощности 4-х ДСП и фильтра 3-ей гармоники. Установка динамического компенсатора включает в себя 2-а понижающего трансформатора, к каждому из которых с помощью тиристорных ключей подключаются однофазные каскады конденсаторов мощностью по 2,3 МВАр. Устройство управления и

контроля включает и отключает эти однофазные конденсаторные каскады в зависимости от потребления ДСП реактивной мощности.

В процессе исследования с помощью прибора фирмы "SIEMENS"проводились записи активной и реактивной мощности как одной, так и группы печей при различных режимах работы статического и динамического звена. На рисунке 3 привелен фрагмент диаграммы изменения реактивной мощности.

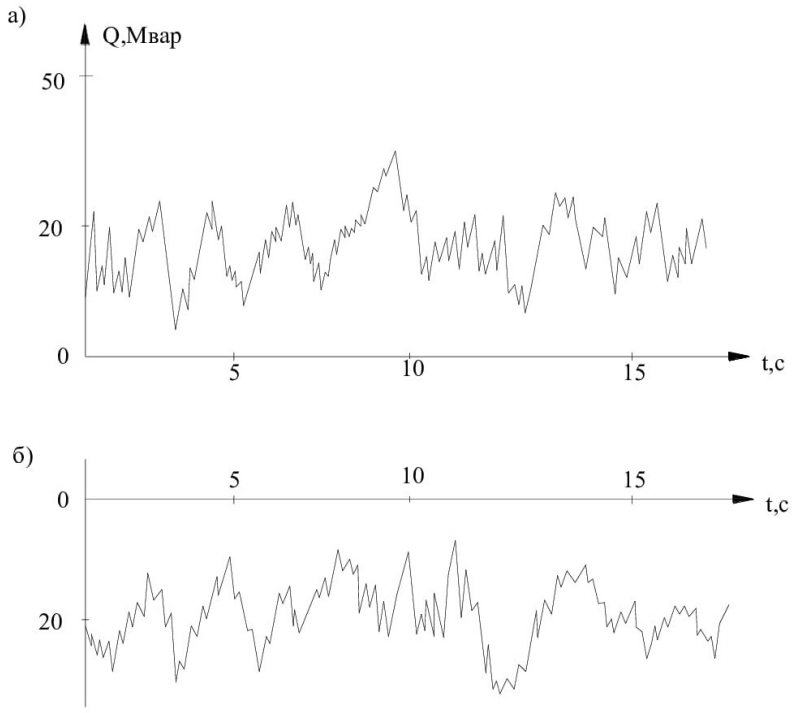

Рис. 3. Фрагменты графиков реактивной мощности группы ДСП при различных режимах работы БСК: а) 2 работающих ДСП, БСК отключен; б) 3 работающих ДСП, БСК включен

Figure 3. Fragments of graphs of reactive power of the EAF group at different operating modes of the BSC: a) 2 operating EAF, BSC is off; b) 3 working chipboard, BSK included

Коэффициент несинусоидальности напряжения на шинах РУ при одновременной работе 3-х печей без БСК находился в пределах $1,5-2\%$, а с включенным БСК снижался до 1%. Коэффициент несимметрии напряжения на шинах при работе 3-х ДСП без динамического звена находился в пределах $0,8-1\%$, а с включенным динамическим звеном уменьшился до $0,5\%$.

В результате проведенных исследований установлено, что при использовании правильно подобранного статического звена, фактический размах колебаний напряжения составит около $1\% : \delta U_{tф} \approx 1\%$ и никаких устройств для снижения этих колебаний предпринимать не нужно.

Устройство динамической компенсации, имеющее время запаздывания более 10мс, не компенсирует, а усиливает часть размахов напряжения,

характеризующихся малой продолжительностью, что не позволяет рекомендовать эти устройства для стабилизации напряжения и снижения фликера в сетях с ДСП.

Действительно, при в ходе исследований были зафиксированы изменения уровня напряжения (рис. 4).

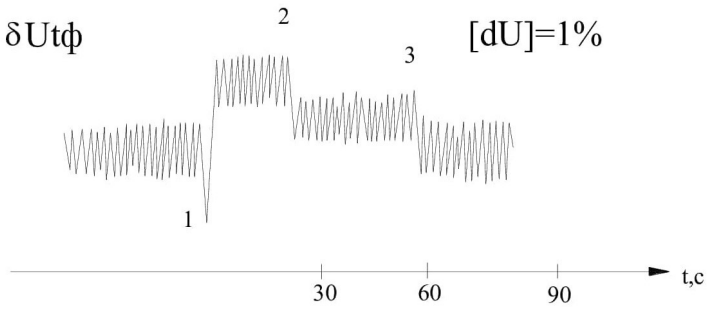

Рис. 4. Диаграмма огибающей напряжения на шинах РУ: 1 – момент включения динамического звена компенсатора; 2,3 – работа устройства РПН трансформатора ГПП

Figure 4. Envelope diagram of the voltage on the busbars of the switchgear: 1 – the moment of switching on the dynamic link of the compensator; 2,3 – operation of the on-load tap-changer of the GPP transformer

Как видно из диаграммы, при включении динамического звена БСК прямой компенсации, в питающей цепи возникают провалы напряжения до $4-6\%$. При отказе от динамической компенсации выполнение требований ГОСТ по условию допустимых искажений напряжения может быть реализовано фильтрами значительно меньшей мощности, так как именно тиристорно-реакторная группа устройства динамической компенсации, а не ДСП является основным источником токов высших гармоник. Завышение мощности фильтров нецелесообразно не только по экономическим факторам. Подключение емкостной нагрузки к шинам ДСП увеличивает на них размах колебаний реактивной мощности и напряжения, так как мощность емкостной нагрузки имеет квадратичную зависимость от напряжения. Размах $\delta Q_{Ф}$ колебаний РМ, которую генерирует фильтр, при колебаниях напряжения с размахом δU, обусловленных работой ДСП, можно определить по выражению:

$$\delta Q_{ф} = Q_{ф.ном}\left[1-(1-\delta U)^2\right] = \frac{2\cdot Q_{ф.ном}\cdot \delta Q_{п.т}}{S_{к.з}}\left(1-0{,}5\cdot\frac{\delta Q_{п.т}}{S_{к.з}}\right), \qquad (11)$$

где $\delta Q_{п.т}$ – размах колебаний РМ печного трансформатора; $S_{к.з}$ – мощность к.з. в точке подключения фильтра; δU – размах колебаний напряжения, выраженный в относительных единицах.

Учитывая, что удельные затраты на фильтры выше, чем на оплату потребления реактивной мощности (РМ) сверх экономических значений, можно

рекомендовать компенсацию РМ до технических пределов, что одновременно обеспечит минимизацию размахов колебаний РМ и напряжения.

Результаты исследований искажения формы кривой напряжения при работе ДСП свидетельствуют о том, что при отсутствии устройств динамической компенсации требования ГОСТ обеспечиваются без включения фильтров. Фильтры необходимы для ограничения потребления при исключении возможности резонанса в параллельно включенных конденсаторах и индуктивных сопротивлениях связи с источником.

В этом случае можно ограничиться фильтром 3-й гармоники с генерирующей мощностью:

$$Q_{ф.ном} = 0,15 \cdot S_{п.т} \cdot N, \tag{12}$$

достаточной для обеспечения технического значения потребляемой РМ для N печей, работающих в режиме расплавления, так как удельные затраты на потребление РМ сверх экономических значений значительно ниже приведенных удельных затрат на фильтры с учетом стоимости потерь электроэнергии.

Предлагаемый подход к выбору компенсирующих устройств позволяет минимизировать фликер за счет снижения $\delta Q_ф$ при одновременном обеспечении минимума затрат на компенсацию РМ в отношении допустимого искажения формы кривой напряжения.

Применив вышеизложенную методику, определим мощность быстродействующего статического компенсатора, состоявшего из статического звена.

Исходными данными являются:

$S_{п.т} = 18\,МВА$; $N = 4$; $U_{ВН} = 35\,кВ$; $U_{НН} = 0,4\,кВ$; $_{з} = 0,75$; $\cos\varphi = 0,87$.

Определим потребляемую печами активную мощность:

$P_р = S_{п.т} \cdot N \cdot \cos\varphi \cdot K_з = 18 \cdot 4 \cdot 0,87 \cdot 0,75 = 46,98\,кВт$.

Потребляемая реактивная мощность составит:

$Q_р = P_р \cdot tg\varphi = 46,98 \cdot 0,57 = 26,78\,кВАр$.

Если принять во внимание экономически оптимальную реактивную мощность, передаваемую в рассматриваемый узел нагрузки от системы, которая определяется коэффициентом мощности системы (для Норильской энергосистемы он равен 0,93), то можно определить минимальную мощность компенсирующих устройств.

$Q_с = P_р \cdot tg\varphi_с = 46,98 \cdot 0,4 = 18,79\,МВАр$;

$Q_{ку} = Q_р - Q_с = 26,78 - 18,79 \approx 8\,МВАр$.

Определим рекомендуемую мощность фильтрокомпенсирующего устройства:

$Q_{ф.ном} = 0,15 \cdot S_{п.с} \cdot N = 0,15 \cdot 18 \cdot 4 = 10,8\,МВАр$.

При такой мощности быстродействующего статического компенсатора $tg\varphi$ изменится до значения:

$$tg\varphi = \frac{Q_{ф.ном} + Q_р}{P_р} = \frac{26,78 - 10,8}{46,98} = 0,34; \tag{13}$$

Коэффициент мощности составит:

$$\cos\varphi = 0,95.$$

Колебания напряжения при работе устройства прямой компенсации уменьшаются до значения:

$$V_t = \frac{\Delta Q_{\text{ф.ном}} \cdot 100}{S_{\text{к.з}}} = \frac{10,8 \cdot 100}{1389} = 0,78 \leq 1\%.$$

Выводы

Из расчетов видно, что установив фильтр 3-ей гармоники на шинах ЗРУ-35 кВ достигнуты существенные результаты, а именно обеспечена минимизация размахов напряжения (до $0,78\%$) и одновременно решен вопрос компенсации реактивной мощности ($\cos\varphi = 0,95$) при минимальных удельных затратах.

Список литературы

1. Кручинин А. М., Чурсин А. Ю. Влияние формы тока дуги на реактивность эквивалентной схемы дуговых сталеплавильных печей, *Электричество*, 2020. №9, С. 40–44 DOI: 10.24160/0013-5380-2020-9-40-44.
2. Гурбанова Г. А., Оразбердиева Э. Учет особенностей работы дуговых сталеплавильных печей в проектировании системы электроснабжения / *Инновационные научные исследования в современном мире: теория, методология, практика*, Сборник научных статей по материалам VI Международной научно-практической конференции, 2021, С. 68–71.
3. Клюев Р. В., Васильев И. Е., Котова О. А. Компенсация реактивной мощности в системах электроснабжения с нелинейными нагрузками / *Материалы II Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы электроэнергетики и пути их решения»*. Дагестан, 2011, С. 31–38.
4. Гаврина О. А., Кодоев З. А., Фоменко П. С., Якушина Е. И. Исследование качества электроэнергии в системе электроснабжения промышленных предприятий / *Проблемы автоматизации. Региональное управление. Связь и акустика*, Сборник трудов XI Всероссийской научной конференции и молодежного научного форума. Ростов-на-Дону - Таганрог, 2022, С. 354–359.
5. Клюев Р. В., Фоменко О. А., Босиков И. И., Гаврина О. А. Исследование качества электроэнергии тяговых подстанций высокогорного рудника, *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, 2021. Т. 4, С. 399–416.
6. Klyuev R. V., Bosikov I. I., Alborov A. D. Research of non-sinusoidal voltage in power supply system of metallurgical enterprises, *Advances in Automation. RusAutoCon 2019. Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2019. vol. 641, pp. 393–400 DOI: 10.1007/978-3-030-39225-3_42.
7. Булычева Е. А., Янченко С. А. Экспериментальное определение влияния источников искажений на несинусоидальность напряжения сети / *Управление качеством электрической энергии*, Сборник трудов Международной научно-практической конференции. Москва, 2022, С. 13–19.
8. Куделина Д. В., Губанов А. М. Влияние качества электроэнергии на энергоэффективность в системах электроснабжения промышленных предприятий / *Энергетическая безопасность*, Сборник научных статей III Международного конгресса. В 2-х томах, 2020, С. 160–172.
9. Mahela O. P., Shaik A. G. Power quality improvement in distribution network using DSTATCOM with battery energy storage system, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016. vol. 83, pp. 229–240 DOI: 10.1016/j.ijepes.2016.04.011.
10. Hernández J. C., Ortega M. J., Cruz J. De la, Vera D. Guidelines for the technical assessment of harmonic, flicker and unbalance emission limits for PV-distributed generation, *Electric Power Systems Research*, 2014. vol. 68, no. 7, pp. 1247–1257 DOI: 10.1016/j.epsr.2011.03.012.
11. Norouzi H., Abedi S., Jamalzadeh R., Rad M. G., Hosseinian S.H. Modeling and investigation of harmonic losses in optimal power flow and power system locational marginal pricing, *Energy*, 2014. vol. 68, pp. 140–147 DOI: 10.1016/j.energy.2014.02.010.
12. Bhonsle D. C., Kelkar R. B. Analyzing power quality issues in electric arc furnace by modeling, *Energy*, 2016. vol. 115, no. 1, pp. 830–839 DOI: 10.1016/j.energy.2016.09.043.

Информация об авторах

Махошев Артур Ахматович – магистрант, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), ORCID 0000-0002-1314-6151.

Гаврина Оксана Александровна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Россия, ORCID 0000-0002-9712-9075.

Клюев Роман Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технология горного и нефтегазового производства», Московский политехнический университет, Россия, ORCID 0000-0003-3777-7203.

References

[1] Kruchinin A. M., Chursin A. Yu. Vliyanie formy toka dugi na reaktivnost' ekvivalentnoj skhemy dugovyh staleplavil'nyh pechej [The influence of the arc current waveform on the electric arc steelmaking furnace equivalent circuit reactance]. Elektrichestvo [Electrichestvo]. 2020, 9, 40–44. DOI:10.24160/0013-5380-2020-9-40-44 (In Russian).

[2] Gurbanova G.A., Orazberdieva E. Uchet osobennostej raboty dugovyh staleplavil'nyh pechej v proektirovanii sistemy elektrosnabzheniya [Accounting for the features of the operation of arc steel-smelting furnaces in the design of the power supply system]. Innovacionnye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire: teoriya, metodologiya, praktika. Sbornik nauchnyh statej po materialam VI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. Ufa, 2021, 68–71. (In Russian).

[3] Klyuev R.V., Vasiliev I.E., Kotova O.A. Kompensaciya reaktivnoj moshchnosti v sistemah elektrosnabzheniya s nelinejnymi nagruzkami [Compensation of jet power in systems of power supply with nonlinear loadings]. Materialy II Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Sovremennye problemy elektroenergetiki i puti ih resheniya». Dagestan, 2011, 31–38. (In Russian).

[4] Gavrina O.A., Kodoev Z.A., Fomenko P.S., Yakushina E.I. Issledovanie kachestva elektroenergii v sisteme elektrosnabzheniya promyshlennyh predpriyatij [Study of the quality of electricity in the power supply system of industrial enterprises]. Problemy avtomatizacii. Regional'noe upravlenie. Svyaz' i akustika. Sbornik trudov XI Vserossijskoj nauchnoj konferencii i molodezhnogo nauchnogo foruma. Sost. YU.B. SHCHemeleva, S.V. Kiril'chik, A.YA. Nomerchuk. Rostov-na-Donu - Taganrog, 2022, 354–359 (In Russian).

[5] Klyuev R.V., Fomenko O.A., Bosikov I.I., Gavrina O.A. Issledovanie kachestva elektroenergii tyagovyh podstancij vysokogornogo rudnika [Research of electric power quality of traction substations of a high mountain miner]. Proceedings of the Tula states university-sciences of earth. 2021, 4, 399–416 (Russian).

[6] Klyuev R.V., Bosikov I.I., Alborov A.D. Research of non-sinusoidal voltage in power supply system of metallurgical enterprises. Advances in Automation. RusAutoCon 2019. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2019, 641. 393-400. DOI:10.1007/978-3-030-39225-3_42.

[7] Bulycheva E.A., Yanchenko S.A. Eksperimental'noe opredelenie vliyaniya istochnikov iskazhenij na nesinusoidal'nost' napryazheniya seti. Upravlenie kachestvom elektricheskoj energii. Sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. Moskva, 2020, 13-19 (Russian).

[8] Kudelina D.V., Gubanov A.M. Vliyanie kachestva elektroenergii na energoeffektivnost' v sistemah elektrosnabzheniya promyshlennyh predpriyatij. Energeticheskaya bezopasnost'. Sbornik nauchnyh statej III Mezhdunarodnogo kongressa. V 2-h tomah. 2020. 160-172. (In Russian).

[9] Mahela O.P., Shaik A.G. Power quality improvement in distribution network using DSTATCOM with battery energy storage system. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 83, 229-240. DOI:10.1016/j.ijepes.2016.04.011

[10] Hernández J.C., Ortega M.J., Cruz J. De la, Vera D. Guidelines for the technical assessment of harmonic, flicker and unbalance emission limits for PV-distributed generation. Electric Power Systems Research, 2011, 81, 7, 1247-1257. DOI:10.1016/j.epsr.2011.03.012

[11] Norouzi H., Abedi S., Jamalzadeh R., Rad M.G., Hosseinian S.H. Modeling and investigation of harmonic losses in optimal power flow and power system locational marginal pricing. Energy, 2014, 68, 140–147. DOI:10.1016/j.energy.2014.02.010

[12] Bhonsle D.C., Kelkar R.B. Analyzing power quality issues in electric arc furnace by modeling. Energy, 2016, 115, 1, 830–839. DOI:10.1016/j.energy.2016.09.043

Information about authors

Mahoshev Artur Ahmatovich – past master, The North Caucasian Institute of mining and metallurgy (State Technological University), ORCID 0000-0002-1314-6151.

Gavrina Oksana Alexandrovna – Ph.D. (Tech.), Associate Professor of the Department of Information Technologies and Systems, The North Caucasian Institute of mining and metallurgy (State Technological University), Russia, ORCID 0000-0002-9712-9075.

Klyuev Roman Vladimirovich – D.Sc. (Tech.), Professor of Technique and technology of mining and oil and gas production department, Moscow Polytechnic University, Russia, ORCID 0000-0003-3777-7203.