

Корнилов Г.П., Газизова О.В., Абдулвелеев И.Р., Бунин А.А., Лыгин М.М.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

РАСШИРЕНИЕ СВОЙСТВ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В СИСТЕМАХ ВНУТРИЗАВОДСКОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Одним из наиболее энергоемких производств металлургического предприятия является кислородно-конвертерное. Потребители электроэнергии таких цехов предъявляют высокие требования к качеству напряжения. В то же время электроприемники таких цехов могут существенно снижать показатели качества электроэнергии. В представленной работе оценен уровень напряжения в действующей сети кислородно-конвертерного цеха напряжением 10 кВ. Выявлено снижение напряжения ниже уровня, допустимого по условиям работы электроприемников. Определены причины снижения напряжения в условиях работы сети сложной конфигурации. Разработана математическая модель для исследования показателей качества электроэнергии рассматриваемого цеха с учетом характеристик питающей сети. Исследовано влияние уровня напряжения питающей сети, регулирующего эффекта нагрузки, мощности нагрузки и конфигурации питающей сети на уровень напряжения. Разработан комплекс мероприятий по повышению качества напряжения. С учетом показателей качества электроэнергии рекомендованы к установке компенсирующие устройства. Произведено технико-экономическое сравнение вариантов установки компенсирующих устройств с учетом потерь мощности и электроэнергии в питающей и распределительной сети цеха. Оценен общий уровень потерь в составе электропотребления кислородно-конвертерного цеха. Показано его снижение при внедрении рекомендованных мероприятий.

Ключевые слова: кислородно-конвертерный цех, качество напряжения, потери мощности и электроэнергии, потребление электроэнергии, компенсирующие устройства.

ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование систем управления технологическими режимами и повышение энергоемкости цехов металлургических предприятий повышает требования к поддержанию качества электроэнергии на шинах главных понизительных подстанций. Повышенные требования к поддержанию уровня напряжения на шинах 10 кВ обусловлены тем, что большая часть цеховых электроприемников – крановые асинхронные двигатели, тиристорные преобразователи – весьма чувствительны к снижению напряжения. Снижение напряжения для таких приемников может вызвать аварийную ситуацию и простой оборудования. В то же время сами электроприемники обладают характеристиками, снижающими качество электроэнергии в сети. Основная сложность анализа подобных режимов заключается в том, что уровень напряжения цеховой сети зависит от большого количества факторов. К ним относятся уровень напряжения со стороны питающей сети, потребляемая нагрузкой активная и реактивная мощность, регулирующий эффект нагрузки и наличие дополнительных источников реактивной мощности. Задача поддержания заданного уровня напряжения осложняется различными условиями работы питающей сети и невозможностью постоянного использования системы регулирования напряжения питающего трансформатора 110/10 кВ. В рамках данной работы предполагается исследование изложенных вопросов и разработка рекомендаций по обеспечению поддержания показателей качества напряжения заводской сети.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Исследованию влияния параметров электроприемников и характеристики питающей сети на уровень

напряжения посвящено большое число работ отечественных и зарубежных ученых. Работа [1] посвящена разработке нового метода расчета параметров гармонических фильтров статического компенсатора дуговой печи. В труде [2] изложены вопросы экспериментального исследования электромагнитной совместимости современных электроприводов, применяемых в системе электроснабжения металлургического предприятия. Технико-экономическое сравнение компенсирующих устройств для дуговых печей широкого класса мощности показано в работе [3]. Работа [4] излагает новый метод контроля состояния стабильности напряжения шины взаимосвязанной энергосистемы с использованием измерений переменных шин. Исследованию оптимального местоположения и настройки STATCOM с помощью улучшения устойчивости переходных процессов на основе генетического алгоритма посвящена работа [5]. Вопросы управления изложены в трудах [6], представляющем обобщенную схему управления активными фронтальными многоуровневыми преобразователями, и [7], показывающем эффективный метод торможения для управляемых приводов переменного тока с передней панелью диодного выпрямителя. Вопросы управления выпрямителями представлены в трудах [8-10]. В них показано управление активным входным выпрямителем при несбалансированном напряжении питания и пульсациях постоянного тока и при несбалансированном напряжении сети с использованием интеллектуального управления током. Вопросам устранения пульсаций и коррекции коэффициента мощности посвящены работы [11-13]. Анализу электромагнитной совместимости цепи переменного и постоянного тока посвящены работы [14, 15]. Особую роль при выборе параметров компенсирующих устройств играют резонансы в мощной активной выпрямительной системе с активным фронтом, изложенные в [16]. Метод полуволновой симметрии SHE-PWM для многоуровневых преобразователей напряжения

© Корнилов Г.П., Газизова О.В., Абдулвелеев И.Р., Бунин А.А., Лыгин М.М., 2021

изложен в работе [17]. Моделированию прогнозирующего управления выпрямителем AFE с динамическими ссылками посвящен труд [18]. Работа DFIG, подключенного к сети, в условиях несбалансированного напряжения сети изложена в труде [19]. Стратегии управления, основанные на симметричных компонентах для преобразователей, подключенных к сети, при провалах напряжения показаны в работе [20].

Очевидно, что большая часть работ исследует влияние отдельных показателей на уровень напряжения. Данная работа предполагает комплексное исследование факторов, определяющих уровень напряжения в разветвленной цеховой сети. Также предполагается разработка мероприятий по повышению качества напряжения. Альтернативным средством повышения и стабилизации напряжения на шинах 10 кВ является использование конденсаторов в составе фильтров высших гармоник, настроенных на 5-ю и 7-ю гармоники. При этом необходимо выполнить расчет установленной мощности, выбор конфигурации дополнительных устройств компенсации реактивной мощности, а также мест их установки.

ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования была выбрана система электроснабжения кислородно-конвертерного цеха. Источником питания главной понизительной подстанции является сетевая подстанция 110 кВ с мощностью короткого замыкания 6000 МВА и сложной конфигурацией. В связи с этим уровни напряжения на вводах подстанции могут изменяться от 104 до 116 кВ. От питающей подстанции до главной понизительной подстанции цеха проложены кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена длиной 840 м. На главной понизительной подстанции установлены два понижающих трансформатора установленной мощностью 80 МВА каждый. Далее к шинам распределительного устройства 10 кВ проложены кабели по 100 м с изоляцией из сшитого полиэтилена и последовательно с целью снижения токов короткого замыкания подключены реакторы. Основными электроприемниками цеха являются асинхронные двигатели мощностью от 400 до 3150 кВт, комплектные трансформаторные подстанции 10/0,4 кВ, выпрямительные подстанции, полупроводниковые преобразователи серии КТЭ, три синхронных двигателя управляемых частотными преобразователями мощностью 5600 кВт. Суммарная максимальная активная мощность нагрузки достигает 80 МВт, реактивная 64 Мвар. Нагрузка в системе электроснабжения цеха имеет спокойный характер, без сильных набросов. Основная часть потребителей относится к первой и второй категориям электроснабжения.

Перерыв в электроснабжении практически любого электроприемника приводит к простоям основного оборудования и недовыпуску либо снижению качества продукции. Наиболее ответственными потребителями являются: шламовая насосная станция, насосно-фильтровальная станция, блок очистных сооружений, кислородная компрессорная станция №7, насосная высокого давления, дымососы конвертерного отделения, паросилового цеха, а также потребители конвертерного отделения и непрерывной разливки стали. Перерыв в электроснабжении каждого из этих электроприемников

приведет к длительным простоям всего основного оборудования ККЦ. К наиболее чувствительным к качеству электрической энергии и к снижению напряжения на шинах подстанции можно отнести тиристорные преобразователи и краны, работающие на переменном напряжении без частотного регулирования. В частности, крановая нагрузка транспортно-отгрузочной линии.

Как было отмечено ранее, основной проблемой данного объекта является поддержание напряжения на шинах цеховой подстанции 10 кВ на заданном уровне. В условиях кислородно-конвертерного цеха оптимальный уровень напряжения на шинах 10 кВ лежит в пределах 9,8-10 кВ. Причем в силу технических причин встречное регулирование напряжения трансформатора 80 МВА исключено. Увеличение напряжения на шинах до 10,4 кВ на практике не приводит к видимым негативным процессам. Повышение напряжения на шинах 10 кВ выше 10,5-10,6 кВ нередко влечет за собой сокращение срока службы и выход из строя тормозных соленоидов, катушек контакторов в оперативных цепях на кранах, питаемых от сети переменного напряжения, в частности транспортно-отгрузочной линии. Однако снижение напряжения на шинах 10 кВ подстанции ниже 9,6 также влечет за собой негативные последствия, выражающиеся в заметном снижении скорости и момента электродвигателей кранового и другого оборудования. Возникают отказы в работе кранового оборудования по причине отпадания сердечников контакторов или недостаточного прижима. При снижении напряжения на шинах 10 кВ ниже 9,4 кВ возникают отказы тиристорных преобразователей и преобразователей частоты. Также в нормальных режимах работы при снижении напряжения ниже 9,8, возникает вопрос о снижении надежности электроснабжения. Это связано с тем, что если один из трансформаторов выйдет из работы, то напряжение снизится до 9,3-9,2 кВ. Работа на таком уровне напряжения может повлечь за собой череду отказов в работе различного оборудования.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Наличие большого количества электроприемников на основных секциях 10 кВ и отсутствие достоверной информации о режимах электропотребления обусловили необходимость проведения экспериментальных исследований для уточнения фактических значений тока, активной и реактивной мощностей электроприемников, а также напряжения на 1-4 сборных шинах при различных конфигурациях сети, а также напряжения на стороне сети 110 кВ на шинах питающей подстанции. По каждой секции шин произведена подготовка архивных данных по следующим присоединениям: вводные фидеры (ток, активная, реактивная мощности), трансформатор напряжения и напряжение на соответствующей секции на стороне 110 кВ, а также по вводам на все литерные распределительные устройства 10 кВ (ток, активная, реактивная мощности). Все архивные данные синхронизированы по времени с периодичностью в пять секунд. Сбор данных производился в течение суток. Для проведения наиболее полного анализа и выявления зависимости изменения напряжения на секции шин от напряжения со стороны сети

110 кВ и нагрузок на литерных подстанциях были собраны данные во время нормального режима работы сети 10 кВ и для ремонтного режима работы подстанции на одном трансформаторе.

На подстанции 10 кВ цеха системы шин нагружены несколько неравномерно. На 1-й и 2-й системах шин нагрузка несколько выше, чем на 3-й и 4-й. Также на 1-й и 2-й системах шин основная нагрузка имеет индуктивный характер, это асинхронные двигатели насосно-фильтровальной станции, ЦВС, кислородная компрессорная, НВД. Коэффициент мощности на данных системах шин находится в пределах 0,73-0,82. На 3-й и 4-й системах шин нагрузка несколько ниже, чем на 1-й и 2-й.

Исходя из этого на первом этапе исследования было решено наибольшее внимание обратить на исследование характера нагрузок и выявить основные параметры и режимы, приводящие к снижению напряжения до уровня 9,4 кВ при штатном режиме сети 10 кВ. На **рис. 1** представлена совокупность графиков изменения напряжения на шинах питающей и цеховой подстанции на одном временном диапазоне.

Для анализа зависимости уровня напряжения на цеховой подстанции 10 кВ от уровня нагрузки и от напряжения на шинах 110 кВ головной подстанции был проведен статистический анализ данных. Одномерный статистический анализ совокупности данных, состоящих из наблюдений и характеризующих их переменных, заключается в рассмотрении каждой отдельной переменной и исследовании их попарной взаимосвязи. Естественно, такой подход весьма ограничен, так как закономерности и взаимосвязи, присущие всей совокупности, невозможно выявить, исследуя каждую переменную в отдельности. Исходя из данных корреляционного анализа, прослеживается ряд зависимостей напряжения на цеховой подстанции, в первую очередь от напряжения в сети 110 кВ (коэффициент корреляции 0,75). Для анализа воздействия на уровень напряжения значений тока, активной и реактивной мощностей по всем присоединениям, а также уровня напряжения на стороне 110 кВ был проведен регрессионный анализ. На основании массива данных найдены оценки этих параметров, статистические ошибки оценок и проверена адекватность этой модели экспериментальным данным.

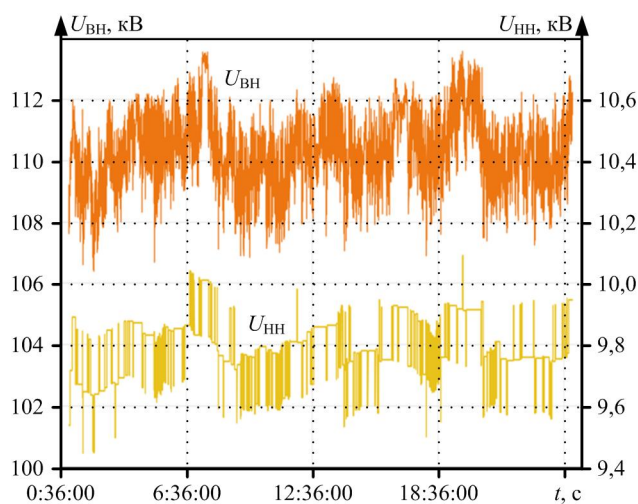


Рис. 1. Изменение напряжения на питающей и цеховой подстанциях

Анализ результатов регрессионного анализа показал, что потребление активной мощности не слишком влияет на уровень напряжения на шинах 10 кВ в нормальном режиме работы. Таким образом, основным по значимости фактором, оказывающим влияние на уровень напряжения 1-й и 2-й секций 10 кВ является напряжение на питающей подстанции 110 кВ. Вторым по значимости фактором является генерация реактивной мощности на уровне 10 кВ собственными компенсирующими устройствами. Поэтому для разработки мероприятий по обеспечению уровня напряжения подстанции необходимо выбрать рекомендуемую мощность компенсирующих устройств в зависимости от напряжения питающей сети и величины нагрузки.

В качестве основного средства регулирования напряжения предлагается использовать фильтрокомпенсирующие устройства различных номинальных мощностей на 5-ю и 7-ю гармоники. Сначала в виде пассивного эксперимента был оценен спектр высших гармоник на цеховой подстанции. С помощью программы просмотра и анализа файлов сигналов SignW версии 3.6 компании ООО «Прософт-Системы» и соответствующего измерительного оборудования был произведен анализ фактического гармонического состава. Далее с целью анализа возможности поддержания напряжения на шинах цеховой подстанции 10 кВ был произведен ряд вычислительных экспериментов с помощью математической модели подстанции и ее нагрузки, созданной в программе «MATLAB». Как показали расчеты, несимметричные составляющие не превышают допустимых значений.

Далее с целью определения мощности компенсирующих устройств проводился ряд расчетов для выбранного наиболее тяжелого режима работы с учетом величины выбранных компенсирующих устройств на основной гармонике. Допустимая область режимов, в которой поддерживается напряжение от 9,8 до 10,4 кВ обеспечивается при мощности компенсирующих устройств 4-8 Мвар на секцию в зависимости от уровня напряжения питающей сети. Результаты расчета наиболее тяжелого режима при работе одного трансформатора приведены на **рис. 2**.

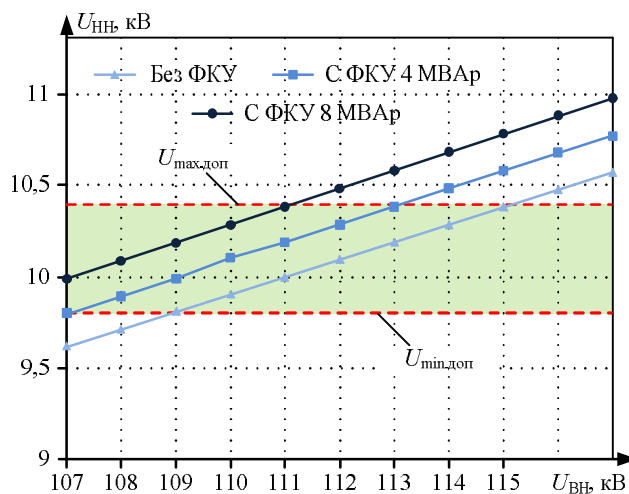


Рис. 2. Изменение напряжения на питающей $U_{ВН}$ и цеховой $U_{НН}$ подстанциях

Как видим, поддержание допустимого уровня напряжения также возможно при установках поперечной компенсации по 8 Мвар на каждую секцию. Аналогичные расчеты были проведены для максимального и минимального режимов работы. Расчеты показали, что при минимальном режиме фильтрокомпенсирующие устройства мощностью 4 Мвар на секцию необходимо отключать при напряжении 114 кВ на шинах питающей подстанции, а мощностью 8 Мвар на секцию необходимо отключать при напряжении 112 кВ.

Таким образом, для технико-экономического обоснования были приняты фильтрокомпенсирующие устройства мощностью 4 и 8 Мвар на секцию с равномерным распределением мощностей по 5-й и 7-й гармоникам. Кроме того, расчеты показали относительно невысокий уровень высших гармоник. Поэтому в качестве альтернативного был принят вариант нерегулируемых батарей статических компенсаторов такой же мощности.

В ходе технико-экономического сравнения учитывались потери в питающих кабелях 110 и 10 кВ, трансформаторах главной понизительной подстанции и в самих фильтрокомпенсирующих устройствах. Кроме того, установка компенсирующих устройств 4 Мвар на секцию позволит повысить уровень напряжения на 2%, а 8 Мвар – на 4 %. Это повлияет на уровень токов, потерь в кабелях и цеховых трансформаторах. Потери в данных элементах также были учтены при проведении расчетов.

Таким образом, установка компенсирующих устройств суммарной мощностью 16 Мвар позволит снизить потери электроэнергии в цехе на 5,92% и потребление электроэнергии цехом на 0,15%. Увеличение суммарной мощности компенсирующих устройств в два раза позволит снизить потери соответственно на 7,8 и 0,2%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Произведен анализ качества напряжения системы электроснабжения кислородно-конвертерного цеха. Опыт эксплуатации показал, что для нормальной работы диапазон изменения напряжения на шинах подстанции должен составлять 9,8-10,4 кВ. Показано, что при большой пропускной способности трансформаторов главной понизительной подстанции 110/10 кВ уровень напряжения на цеховой подстанции 10 кВ определяется прежде всего напряжением питающей сети, а также мощностью компенсирующих устройств. Определена мощность компенсирующих устройств, необходимая для поддержания заданного уровня напряжения.

Установка компенсирующих устройств помимо снижения потерь мощности и электроэнергии в питающей сети приводит к повышению уровня напряжения в целом на стороне 10 кВ. Это ведет к изменению мощности потребителей в соответствии с их статическими характеристиками, снижению токов, потерь мощности и электроэнергии в кабелях и трансформаторах цеховой сети. В то же время повышаются емкостные токи кабельных линий и потери холостого хода в трансформаторах.

С учетом данных факторов разработана методика выбора компенсирующих устройств в цеховой сети, имеющей разветвленную сеть. Методика позволяет

определять целесообразность установки компенсирующих устройств с учетом всех видов потерь в цеховой сети, а также источников реактивной мощности. Может быть использована при выборе компенсирующих устройств промышленных цехов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых – кандидатов наук МК-499.2020.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николаев А.А., Корнилов Г.П., Денисевич А.С. Разработка усовершенствованной методики расчета параметров фильтрокомпенсирующих цепей статического тиристорного компенсатора электродуговой печи // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». 2018. Т. 18. № 4. С. 89-100. doi: 10.14529/power180410.
2. Экспериментальное исследование электромагнитной совместимости современных электроприводов в системе электроснабжения металлургического предприятия / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храшкин, Г.В. Никифоров, Ф.Ф. Муталлапова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. № 4. С. 96-105. doi: 10.18503/1995-2732-2016-14-4-96-105.
3. Корнилов Г.П., Николаев А.А., Пястолова Д.Ю. Технико-экономическое сравнение компенсирующих устройств дуговых печей широкого класса мощности // Электротехнические системы и комплексы. 2016. № 1(30). С. 34-38. doi: 10.18503/2311-8318-2016-1(30)-34-38.
4. Hazarika D. New method for monitoring voltage stability condition of a bus of an interconnected power system using measurements of the bus variables // IET Generation, Transmission & Distribution. 2012. Vol. 6 Is. 10. Pp. 977-985. doi: 10.1049/iet-gtd.2011.0786.
5. Karthikeyan K., Dhal P.K. Investigation of optimal location and tuning of STATCOM by genetic algorithm based transient stability improvement // Journal of Electrical Systems. 2018. 14-2. Pp. 103-117.
6. A generalized control scheme for active front-end multilevel converters / F. Hernandez, T. Moran, J. Espinoza, J. Dixon // 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON) 2001. Vol. 2. Pp. 915-920. doi: 10.1109/IECON.2001.975887.
7. Jiang J., Holtz J. An efficient braking method for controlled AC drives with a diode rectifier front end // Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy. 2000. Vol. 3. Pp. 1446-1453. doi: 10.1109/IAS.2000.882074.
8. Operating region in active-front-end voltage/current source rectifiers / J.R. Espinoza, G. Joos, M.A. Perez, L.A. Moran // Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). 2000. Vol. 2. Pp. 459-464. doi: 10.1109/ISIE.2000.930341.
9. Chomat M., Schreier L., Bendl J. Control of active front-end rectifier under unbalanced voltage supply and DC-link pulsations // IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). 2011. Pp. 324-329. doi: 10.1109/IEMDC.2011.5994868.
10. Power control of an AFE rectifier during unbalanced grid voltage using predictive current control / G. Hunter, R. Peña, I. Andrade, J. Riedemann, R. Blasco-Gimenez // IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). 2015. Pp. 385-390. doi: 10.1109/ISIE.2015.7281499.
11. AFE rectifier control based on virtual flux direct power control and active power ripple elimination under un-balanced network condition / M.H. Saedinia, M. Mehreganfar, S.A Davari, D.A. Khaburi // 9th Annual Power Electronics,

- Drives Systems and Technologies Conference (PEDSTC). 2018. Pp. 253-258. doi: 10.1109/PEDSTC.2018.8343805.
12. Maklakov A.S., Radionov A.A., Gasiyarov V.R. Power factor correction and minimization THD in industrial grid via reversible medium voltage AC drives based on 3L-NPC AFE rectifiers // 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON). 2016. Pp. 2551-2556. doi: 10.1109/IECON.2016.7793315.
 13. Haijun T., Di H. Study of Control Strategy Based Dual-PWM Converter under Unbalanced Input Voltage Condition // Advances in Electronic Engineering, Communication and Management (EECM). 2011. Vol. 1. Pp. 267-272. doi: 10.1007/978-3-642-27287-5_43.
 14. EMC analysis of 18-pulse AC-DC circuit consisting of three level AFE rectifiers based on PWM-SHE method with three switching angles for quarter-period / A.A. Radionov, A.S. Maklakov, E.A. Maklakova, V.R. Gasiyarov, S.S. Voronin // IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW). 2016. Pp. 659-663. doi: 10.1109/EIconRusNW.2016.7448269.
 15. A Flexible Selective Harmonic Mitigation Technique to Meet Grid Codes in Three-Level PWM Converters / L.G. Franquello, J. Napoles, R.C.P. Guisado, J.I. Leon, M.A. Aguirre // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2007. Vol. 54. No. 6. Pp. 3022-3029. doi: 10.1109/TIE.2007.907045.
 16. Resonances in a high-power active-front-end rectifier system / J.R. Rodriguez, J. Pontt, R. Huerta, G. Alzamora, N. Becker, S. Kouro, P. Cortes, P. Lezana // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2005. Vol. 52. No. 2. Pp. 482-488. doi: 10.1109/TIE.2005.843907.
 17. Fei W., Du X., Wu B. Half-wave symmetry SHE-PWM method for multilevel voltage inverters // Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). 2010. Pp. 1732-1735. doi: 10.1109/APEC.2010.5433466.
 18. Model Predictive Control of an AFE Rectifier With Dynamic References / D.E. Quevedo, R.P. Aguilera, M.A. Perez, P. Cortes, R. Lizana // IEEE Transactions on Power Electronics. 2012. Vol. 27. No. 7. Pp. 3128-3136. doi: 10.1109/TPEL.2011.2179672.
 19. Operation of Grid-Connected DFIG Under Unbalanced Grid Voltage Condition / Y. Zhou, P. Bauer, J.A. Ferreira, J. Pierik // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2009. Vol. 24. No. 1. Pp. 240-246. doi: 10.1109/TEC.2008.2011833.
 20. Control Strategies Based on Symmetrical Components for Grid-Connected Converters Under Voltage Dips / S. Alepuz, S. Busquets-Monge, J. Bordonau, J.A. Martinez-Velasco, C.A. Silva, J. Pontt, J. Rodriguez // IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, vol. 56, no. 6, pp. 2162-2173. doi: 10.1109/TIE.2009.2017102.

Поступила в редакцию 21 декабря 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

EXPANDING THE PROPERTIES OF FILTER COMPENSATION DEVICES IN INTERNAL FACTORY POWER SUPPLY SYSTEMS

Gennady P. Kornilov

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department, Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: korn_mgn@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2451-3850>.

Olga V. Gazizova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: logan_b_7@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9416-672X>.

Ildar R. Abdulvelev

Ph.D. (Engineering), Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: leggyild@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2748-6533>.

Aleksandr A. Bunin

Postgraduate student, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: buninworks1@rambler.ru.

Maxim M. Lygin

Postgraduate student, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: eligin@ya.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8884-4846>.

One of the most energy-intensive departments of a metallurgical enterprise is the oxygen-converter plant. Consumers of electricity in such workshops have high requirements for the quality of voltage. At the same time, the electric receivers of such workshops can significantly reduce the quality of electricity. The paper estimates the voltage level in the current network of a 10 kV oxygen-converter plant. A decrease in voltage below the permissible level under the operating conditions of electric receivers was revealed. The reasons for voltage reduction in the conditions of a complex network configuration were determined. A mathematical model was developed to study the power quality

indicators of the shop under consideration taking into account the characteristics of the supply network. The influence of the level of supply voltage, the regulating effect of load, power load and configuration of the supply network on the voltage level was investigated. A set of measures to improve the quality of voltage was developed. Compensating devices were recommended for installation taking into account the power quality indicators. A technical and economic comparison of options for installing compensating devices was made taking into account power and electricity losses in the supply and distribution network of the shop. The total level of losses in the power consumption of the

oxygen-converter plant was estimated. It was shown to decrease when implementing the recommended measures.

Keywords: the oxygen-converter plant, voltage quality, power and energy loss, power consumption of the electric power, compensating device.

REFERENCES

1. 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. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Energetika*. [Bulletin of the South Ural State University. Series: power engineering], 2018, vol. 18, no. 4, pp. 89-100. (In Russian). doi: 10.14529/power180410. (In Russian)
2. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Khramshin T.R., Nikiforov G.V., Mutallapova F.F. Experimental study of electromagnetic compatibility of modern electric drives used in the power supply system of a metallurgical enterprise. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2016, vol. 14, no. 4, pp. 96-105. (In Russian). doi: 10.18503/1995-2732-2016-14-4-96-105.
3. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Pyastolova D.Y. Technical and Economic Comparison of Compensating Devices For Arc Furnaces in Broad Class of Power. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no. 1(30), pp. 34-38. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2016-1(30)-34-38
4. Hazarika D. New method for monitoring voltage stability condition of a bus of an interconnected power system using measurements of the bus variables. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2012. Vol. 6. Is. 10. Pp. 977-985. doi: 10.1049/iet-gtd.2011.0786.
5. Karthikeyan K., Dhal P.K. Investigation of optimal location and tuning of STATCOM by genetic algorithm based transient stability improvement. *Journal of Electrical Systems*. 2018. 14-2. Pp. 103-117.
6. Hernandez F., Moran T., Espinoza J., Dixon J. A generalized control scheme for active front-end multilevel converters. 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON) 2001. Vol. 2. Pp. 915-920. doi: 10.1109/IECON.2001.975887.
7. Jiang J., Holtz J. An efficient braking method for controlled AC drives with a diode rectifier front end. Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy. 2000. Vol. 3. Pp. 1446-1453. doi: 10.1109/IAS.2000.882074.
8. Espinoza J.R., Joos G., Perez M., Moran L.A. Operating region in active-front-end voltage/current source rectifiers. Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). 2000. Vol. 2. Pp. 459-464. doi: 10.1109/ISIE.2000.930341.
9. Chomat M., Schreier L., Bendl J. Control of active front-end rectifier under unbalanced voltage supply and DC-link pulsations. IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). 2011. Pp. 324-329. doi: 10.1109/IEMDC.2011.5994868.
10. Hunter G., Peña R., Andrade I., Riedemann J., Blasco-

- Gimenez R. Power control of an AFE rectifier during unbalanced grid voltage using predictive current control. IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). 2015. Pp. 385-390. doi: 10.1109/ISIE.2015.7281499.
11. Saeedinia M.H., Mehreganfar M., Davari S.A., Khaburi D.A. AFE rectifier control based on virtual flux direct power control and active power ripple elimination under un-balanced network condition. 9th Annual Power Electronics, Drives Systems and Technologies Conference (PEDSTC). 2018. Pp. 253-258. doi: 10.1109/PEDSTC.2018.8343805.
12. Maklakov A.S., Radionov A.A., Gasiyarov V.R. Power factor correction and minimization THD in industrial grid via reversible medium voltage AC drives based on 3L-NPC AFE rectifiers. 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON). 2016. Pp. 2551-2556. doi: 10.1109/IECON.2016.7793315.
13. Haijun T., Di H. Study of Control Strategy Based Dual-PWM Converter under Unbalanced Input Voltage Condition. Advances in Electronic Engineering, Communication and Management (EECM). 2011. Vol. 1. Pp. 267-272. doi: 10.1007/978-3-642-27287-5_43.
14. Radionov A.A., Maklakov A.S., Maklakova E.A., Gasiyarov V.R., Voronin S.S. EMC analysis of 18-pulse AC-DC circuit consisting of three level AFE rectifiers based on PWMSHE method with three switching angles for quarter-period. IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW). 2016. Pp. 659-663. doi: 10.1109/EIConRusNW.2016.7448269.
15. Franquelo L.G., Napoles J., Guisado R.C.P., Leon J.L., Aguirre M.A. A Flexible Selective Harmonic Mitigation Technique to Meet Grid Codes in Three-Level PWM Converters. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2007. Vol. 54. No. 6. Pp. 3022-3029. doi: 10.1109/TIE.2007.907045.
16. Rodriguez J.R., Pontt J., Huerta R., Alzamora G., Becker N., Kouro S., Cortes P., Lezana P. Resonances in a high-power active-front-end rectifier system. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2005. Vol. 52. No. 2. Pp. 482-488. doi: 10.1109/TIE.2005.843907.
17. Fei W., Du X., Wu B. Half-wave symmetry SHE-PWM method for multilevel voltage inverters. Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). 2010. Pp. 1732-1735. doi: 10.1109/APEC.2010.5433466.
18. Quevedo D.E., Aguilera R.P., Perez M.A., Cortes P., Lizana R. Model Predictive Control of an AFE Rectifier With Dynamic References. IEEE Transactions on Power Electronics. 2012. Vol. 27. No. 7. Pp. 3128-3136. doi: 10.1109/TPEL.2011.2179672.
19. Zhou Y., Bauer P., Ferreira J.A., Pierik J. Operation of Grid-Connected DFIG Under Unbalanced Grid Voltage Condition. IEEE Transactions on Energy Conversion. 2009. Vol. 24. No. 1. Pp. 240-246. doi: 10.1109/TEC.2008.2011833.
20. Alepuz S., Busquets-Monge S., Bordonau J., Martinez-Velasco J.A., C.A. Silva, Pontt J., Rodriguez J. Control Strategies Based on Symmetrical Components for Grid-Connected Converters Under Voltage Dips. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, vol. 56, no. 6, pp. 2162-2173. doi: 10.1109/TIE.2009.2017102.

Расширение свойств фильтрокомпенсирующих устройств в системах внутривозовского электро-снабжения / Г.П. Корнилов, О.В. Газизова, И.П. Абдулвелеев, А.А. Бунин, М.М. Лыгин // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 1(50). С. 21-26. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1\(50\)-21-26](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1(50)-21-26)

Kornilov G.P., Gazizova O.V., Abdulvelev I.R., Bunin A.A., Lygin M.M. Expanding the Properties of Filter Compensation Devices in Internal Factory Power Supply Systems. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 1(50), pp. 21-26. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1\(50\)-21-26](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1(50)-21-26)