
УДК 621.311

Б.М. ТАТРОВ, студент гр. ТТ-2024 (ГГАУ)
Научный руководитель И.А. БЕРКО, старший преподаватель
(СКГМИ (ГТУ))
г. Владикавказ

**СПОСОБ УЛУЧШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЦВЕТНОЙ
МЕТАЛЛУРГИИ**

В последние годы вопросы повышения качества электроэнергии в электрических сетях промышленных предприятий приобрели большое практическое значение. Ухудшение качества электроэнергии, как известно, является следствием интенсивного внедрения вентильных преобразователей, мощных электродуговых печей и других нелинейных и ударных нагрузок [1]. Для компенсации воздействия таких потребителей в распределительных сетях 6 и 10 кВ применяют различные типы компенсаторов реактивной мощности, реакторных и синхронных конструкций, а также фильтрокомпенсирующие (ФКУ) и фильтросглаживающие (ФСУ) устройства [2].

В промышленных сетях 380 В удельный вес нелинейных нагрузок невелик, поэтому нормализация качества электроэнергии обычно сводится к компенсации реактивной мощности. Тенденция к разукрупнению предприятий практически исключает возможность наложения мощности отдельных установок и выравнивания нагрузки в сети отдельных потребителей. Однако в ряде производств указанные нагрузки составляют основную часть общей нагрузки сети 380 В. При этом качество электроэнергии не отвечает требованиям ГОСТ 32144-2013, что затрудняет работу оборудования, уменьшает срок его службы и в ряде случаев приводит к значительному экономическому ущербу.

Рассмотрим сети 380 В цеха, где по условиям технологии необходимо плавно изменять напряжение на выходе источника питания. Это достигается изменением углов управления вентильных преобразователей. Для управления применяется переключение нагрузки с треугольника на звезду.

При соединении нагрузки в треугольник и углах управления $\alpha = 95^\circ$ высшие гармоники тока характеризуются значительным уровнем:

$$I_5 = 36 \%,$$

$$I_7 = 13 \%,$$

$$I_{11} = 9 \%,$$

...,

$$I_{23} = 3 \%,$$

$$I_{25} = 1,6 \%,$$

$$I_{29} = 2,14 \%,$$

$$I_{31} = 1,8 \%.$$

При соединении нагрузки в звезду с нулевым проводом наблюдаются большие токи третьей и кратных ей гармоник:

$$I_3 = 33 \%,$$

$$I_6 = 3,7 \%,$$

$$I_9 = 7,3 \%.$$

Кроме того, имеются четные гармоники:

$$I_2 = 6 \%,$$

$$I_4 = 6,4 \%,$$

$$I_8 = 5,9 \%,$$

...,

$$I_{34} = 3,2 \%.$$

Это приводит к искажению формы кривой питающего напряжения. Мощность к. з. на шинах 380 В невелика ($S_{\text{кз}} = 23 \text{ МВА}$), поэтому влияние нелинейной нагрузки значительно. Коэффициент несинусоидальности линейных напряжений достигает 7,2 %, фазных 9,7-10,2 %.

Значение средневзвешенного коэффициента мощности в сети 380 В цеха составляет 0,7-0,8 [2]. Для компенсации реактивной мощности предусматриваются батареи конденсаторов (БК) типа КМ2-0,38-26-3У3 [7]. Однако их эксплуатация практически невозможна из-за перегрузки токами высших гармоник. Чтобы обеспечить нормируемое значение $\cos \phi$, мощность БК должна достигать 320 квар на каждую 1000 кВА мощности питающих трансформаторов. Расчеты показали, что уже при мощности 200 квар в сети 380 В возникает резонанс токов на частоте 350 Гц. Таким образом, необходима защита БК от токов высших гармоник.

Для комплексного решения вопросов качества электроэнергии рекомендуется устанавливать фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ) в сети 380 В. Предлагается для сравнения использовать два типа ФКУ: с использованием фильтров точной настройки или одного так называемого ненастроенного фильтра, отличающегося простотой изготовления и меньшими капитальными затратами. При сравнительно большой мощности БК (Q_p), входящей в состав ФКУ, чувствительность фильтра к частоте настройки снижается, поэтому можно значительно снизить коэффициент несинусоидальности путем установки одного фильтра.

Мощность высоковольтной конденсаторной батареи (БК) при значениях реактивной мощности на секции (320 квар). Для предотвращения перегрузки БК токами высших гармоник необходимо соблюдать следующее условие [5]:

$$Q_p \geq 1.2 k_c I_{v\Sigma} U_{\text{номБК}}, \quad (1)$$

где k_c – коэффициент, определяемый схемой соединения конденсаторов (при соединении в звезду $k_c = 3$, а при соединении в треугольник ($k_c = \sqrt{3}$));

$I_{v\Sigma}$ – действующее значение гармоник тока, протекающих через фильтры; $U_{\text{номБК}}$ – номинальное напряжение батареи конденсаторов.

Ток ($I_{v\Sigma}$) определяется из выражения [5]:

$$I_{\Sigma} = \sqrt{\sum_v (I_v \cdot \sigma_v)^2}, \quad (2)$$

где I_v – ток v -й гармоники, а σ_v – доля этого тока, проходящая через фильтры.

Для снижения уровней 5 и 7 гармоник фильтры точной настройки были рассчитаны по известной методике [3,4]. Суммарная мощность БК составляла 320 квр, при этом относительная мощность Q_p/S_k для фильтра 5-й гармоники равнялась $0,85 \cdot 10^{-2}$, а для фильтра 7-й гармоники – $0,55 \cdot 10^{-2}$. Относительное значение частоты ненастроенного фильтра $f/50$ было выбрано равным 4,8, а его относительная мощность составляла $1,4 \cdot 10^{-2}$. В обоих случаях использовались конденсаторы типа КС2-0,5-36-2У3 с соединением батареи в треугольник. В качестве реакторов использовались дроссели типа Д-301К.

Применение ФКУ с двумя фильтрами точной настройки обеспечило снижение коэффициента несинусоидальности с 7,2 до 2,3%. При включении на такое же напряжение ненастроенного фильтра значение коэффициента несинусоидальности составило 2,75%. В первом случае уровни 5 и 7-й гармоник снижались практически до нуля, во втором – уровень 5-й гармоники снизился с 4,6 до 0,7%, а 7-й – с 3,2 до 1,7%. Однако в первом случае наблюдалось большее усиление 3-й гармоники и более высокие остаточные значения 11-й, 13-й и других высоких гармоник. В первом случае фиксировались перегрузки БК фильтров по току на 10-15%, во втором случае они практически отсутствовали. Установка ФКУ позволила успешно осуществить компенсацию реактивной мощности. Нормативное значение коэффициента мощности обеспечивается при любых режимах работы технологического оборудования.

Таким образом, применение ненастроенных фильтров в сетях 380 В предприятий с большим удельным весом нелинейной нагрузки позволяет эффективно снижать несинусоидальность напряжения сети и успешно осуществлять компенсацию реактивной мощности [6-10].

Заключение

Анализ подтвердил неэффективность батарей конденсаторов в сетях 0,38 кВ с нелинейными нагрузками из-за риска резонанса. Решением являются фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ).

Сравнение ФКУ с фильтрами точной настройки и ненастроенного фильтра показало их эффективность. Оба варианта снижают несинусоидальность до нормы и компенсируют реактивную мощность.

Хотя фильтры точной настройки лучше подавляют целевые гармоники, ненастроенный фильтр выгоднее благодаря меньшей стоимости, простоте и отсутствию риска усиления высших гармоник.

Таким образом, для сетей 380 В ФКУ с ненастроенным фильтром – наиболее рациональное решение, обеспечивающее соответствие стандартам и повышение надежности.

Список литературы:

1. Аксенов, В.В. Компенсация реактивной мощности с фильтрацией токов высших гармоник – реальный путь повышения энергоэффективности передачи и распределения электроэнергии / В.В. Аксенов, Д.В. Быстров, В.Э. Воротницкий, Г.Г. Трофимов // Электрические станции. – 2012. – № 3. – С. 53-60.
2. Берко, И.А., Лисовин, Г.Б., Берко, А.А. Технологическое лидерство в электросетевом секторе // Металлургические технологии и инновации - сегодня и завтра. Сборник докладов I Международной научно-практической конференции, Владикавказ, 2023. – С. 139-147.
3. Берко, И.А., Берко, А.А., Силаев, В.И. Регулирование емкостного компенсатора с помощью моделирования нелинейного участка энергосистемы // В сборнике: Энергетика будущего – цифровая трансформация. Сборник трудов II всероссийской научно-практической конференции. Липецк, 2021. – С. 37-42.
4. Аррилага, Дж.и др. Гармоники в электрических системах, Энергатомиздат. – Москва, 1990. – 319 с.
5. Жежеленко, И.В., Саенко, Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.
6. Карташев, И.И. и др. Управление качеством электроэнергии: учебное пособие. – Москва: МЭИ, 2006. – 319 с.
7. Кудрин, Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий: учебное пособие. – Москва, 2005.
8. Жежеленко, И. В. Электромагнитная совместимость потребителей: моногр. / И.В. Жежеленко [и др.]. – Машиностроение. – 2012. – 351 с.

**VIII Международная молодежная научно-практическая
конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»**

246-5

21-22 ноября 2025 г.

9. Руководство по компенсации реактивной мощности с учетом влияния гармоник. – Техническая коллекция Schneider Electric, 2008. – вып. 21. – 32 с.

10. Татров, Б.М., Гаврин, И.А., Амосов, М.А., Плиева, М.Т. Снижение потерь электроэнергии в распределительных сетях: технические и организационные аспекты // Сборник материалов XXII Всероссийской научно-практической конференции студентов и аспирантов. Старый Оскол, 2025. – Т.1. – С. 32-35.

Информация об авторах:

Татров Борис Маратович, студент гр. ТТ-2024, ГГАУ, 362040, г. Владикавказ, ул. Кирова, д. 37

Берко Ирина Александровна, старший преподаватель, СКГМИ(ГТУ), 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, д.44, bia-1995@mail.ru