

УДК 621.316.72

**Кирисов Игорь Геннадьевич** ассистент кафедры электроэнергетики  
Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков, Украина. Ул. Университетская 16, г. Харьков,  
Украина, 61003

### ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ТИРИСТОРНЫХ ИСТОЧНИКОВ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПРИ СПЕЦИФИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

*В статье рассматриваются вопросы применения тиристорных источников реактивной мощности при специфических нагрузках. Определены возможные проблемы при воздействии мощных вентильных преобразователей на питающую сеть. Предложены несколько вариантов компенсации реактивной мощности в сетях с вентильной нагрузкой.*

**Ключевые слова:** система электроснабжения предприятий, качество электроэнергии, компенсирующие устройства, потери электроэнергии, снижение потерь электроэнергии.

**Кирисов Игорь Геннадійович** асистент кафедри електроенергетики  
Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків, Україна. Вул. Університетська, 16, м. Харків, Україна,  
61003

### ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СТАТИЧНИХ ТИРИСТОРНИХ ДЖЕРЕЛ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ПРИ СПЕЦИФІЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

*У статті розглядаються питання застосування тиристорних джерел реактивної потужності при специфічних навантаженнях. Визначені можливі проблеми при впливі потужних вентильних перетворювачів на живильну мережу. Запропоновано кілька варіантів компенсації реактивної потужності в мережах з вентильним навантаженням.*

**Ключові слова:** система електропостачання підприємств, якість електроенергії, пристрої, що компенсують, втрати електроенергії, зниження втрат електроенергії

**Kirisov Igor Gennadievich**, assistant of department of electroenergy  
Ukrainian engineer-pedagogical academy, Kharkov, Ukraine str. Universitetskaya 16, Kharkov, Ukraine, 61003

### THE PARTICULARITIES OF THE USING THE STEADY-STATE THYRISTOR SOURCES TO REACTIVE POWER UNDER SPECIFIC LOAD

*In article are considered questions of the using the thyristor sources to reactive power under specific load are. Determined possible problems at influence of the powerful valve converters on supplying network. They Are Offered several variants to compensations to reactive power in set with valve nagruzkoj.*

**Keywords:** system of supply enterprise, quality to electric powers, compensating device, loss to electric powers, reduction of the losses elektroenergii.

#### Введение

Повышение качества электроэнергии (КЭ) является технико-экономической проблемой. Основной причиной ухудшения КЭ в системах электроснабжения предприятий (СЭС) является эксплуатация резкопеременных, нелинейных и несимметричных элетроприемников (ЭП) – ДСП, вентильных преобразователей (ВП), печей электрошлакового переплава (ЭШП).

Для средних и крупных предприятий с развитой электротехнологий (металлургические, машиностроительные, химические предприятия) обеспечение требуемого уровня показателей качества электроэнергии (ПКЭ) без применения специальных компенсирующих устройств (КУ), как правило, невозможно. При этом целесообразно использовать многофункциональные КУ [1], позволяющие одновременно улучшать несколько ПКЭ и параметров режима сети. Так, полупроводниковые стабилизаторы мощности (ПСМ) обеспечивают снижение размаха изменения напряжения в режиме расплава ДСП, а также уменьшают коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения ( $K_v$ ). Фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ), оснащающие схему питания индукционных печей, позволяют наряду со снижением несимметрии и несинусоидальности компенсировать реактивную мощность (РМ), улучшать режим напряжения по первой гармонике основной частоты.

### Основная часть

Многообразие и противоречивый характер требований к компенсирующим устройствам в СЭС со специфическими нагрузками вызывают необходимость комплексного, системного решения проблемы КЭ.

Разновидностью статических тиристорных компенсаторов реактивной мощности (СТК) являются конденсаторные батареи (КБ). Одной из особенностей КБ является ступенчатое регулирование, осуществляемое в настоящее время преимущественно выключателями с электромеханическим приводом. Такой способ регулирования характеризуется значительной инерционностью, что усложняет его использование для снижения размаха изменения напряжения в переходных процессах, сопровождающихся сверхтоками и перенапряжениями. Причинами этого являются недостаточное быстродействие и случай характер момента коммутации.

Устранить указанные недостатки возможно использованием тиристорных выключателей, обладающих быстродействием (14 коммутационных операций в секунду) и позволяющих управлять моментом включения и отключения КБ.

Управляемые тиристорами КБ имеют ряд положительных характеристик: широкий диапазон регулирования, низкие эксплуатационные расходы и удельные потери электроэнергии, значительная скорость компенсации, возможность пофазного регулирования РМ. Однако они имеют ряд существенных недостатков: необходимость использования управляемых вентилях с номинальным напряжением, равным удвоенному амплитудному значению напряжения сети, возможность перегрузки высшими гармониками (ВГ) конденсаторов, ступенчатое регулирование РМ, сложность системы автоматического регулирования (управления) и схем защиты

Использование тиристорных позволяет создать устройства с плавным регулированием РМ конденсаторных батарей [2] (рис.1).

Регулирование РМ СТК может осуществляться: изменением угла проводимости тиристорных; изменением индуктивности реактора, коммутируемого тиристорами, включенного параллельно или последовательно с КБ. Интенсивно используются в эксплуатации схемы с тиристорно-реакторными группами, рис. 2. По сравнению с КБ реакторы, регулируемые тиристорами, обеспечивают ограничение скорости нарастания тока и его амплитудного значения, облегчая тем самым режим работы тиристорных, симметрируют импульс тока относительно моменту времени, соответствующему нулевому значению напряжения, что обеспечивает естественную коммутацию тока тиристорных.

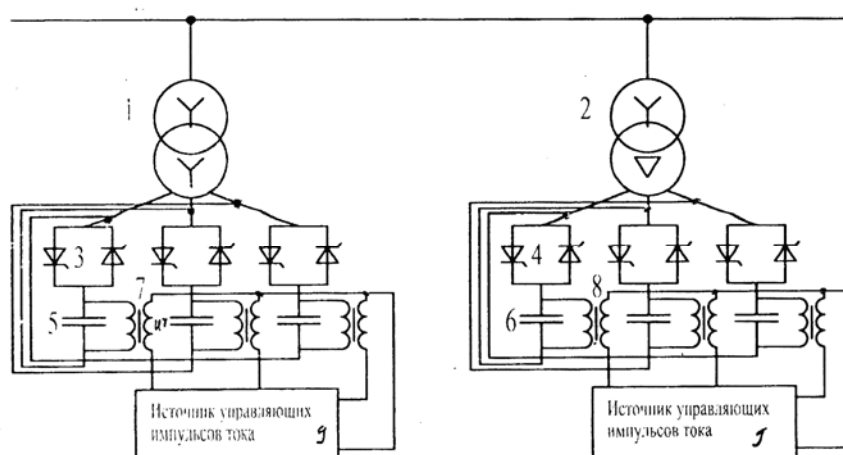


Рис.1 Схема СТК с плавным регулированием КБ:

1, 2 – силовые трансформаторы, 3, 4 – тиристоры, 5, 6 – конденсаторные батареи, 7, 8 – импульсные трансформаторы

Схемы с тиристорно-реакторными группами (ТРГ) характеризуются быстродействием, значением коэффициента снижения колебаний напряжения, не превышающим 70 %,

снижением размаха изменения напряжения до 1 %, повышением коэффициента мощности, снижением несимметрии напряжения.

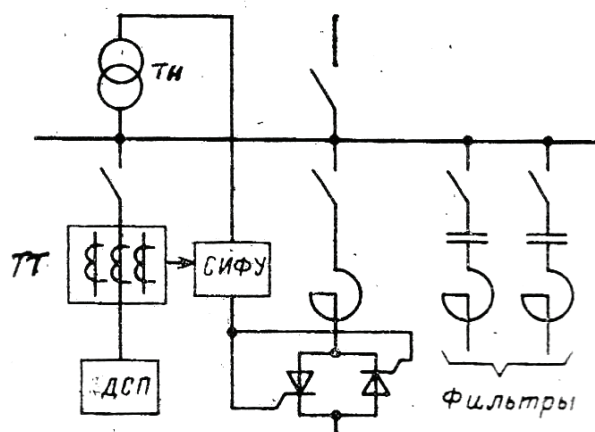


Рис. 2. Схема СТК с тиристорно-реакторными группами

Схемы СТК с использованием ТРГ в совокупности с ФКУ и синхронными компенсаторами (СК) широко используют в электросталеплавлении как в зарубежной, так и в отечественной металлургии. Однако эта группа компенсаторов является источником ВГ, требующим дополнительных затрат на устройства их компенсации.

В современных промышленных сетях при специфических нагрузках наблюдается тенденция замены коммутационных аппаратов с электромеханическим приводом на бесконтактные. Бесконтактная коммутационно-регулирующая многофункциональная аппаратура (БКРА) напряжением выше 1 кВ (10,6 кВ) используется в системах промышленного электроснабжения предприятий с мощностью к. з. в сетях 10,6 кВ до 1500мВА без реактирования и ограничения. При этом ударного тока к. з. в любой точке сети с уменьшением термического и динамического воздействия на элементы сети и позволяет обеспечить нормальную работу коммутационных аппаратов.

Использование БКРА в СЭСП решает вопросы электромагнитной совместимости электроприемников и сетей в том числе ЭП со специфическим режимом работы, что обеспечивает нормируемое КЭ, сокращает потери в сетях, улучшает условия функционирования оборудования во всех режимах работы СЭС.

На промышленных предприятиях широко используются ЭП со специфическим режимом работы, являющиеся источниками различного рода электромагнитных помех (ЭМП). Эти помехи отрицательно влияют как на сами ЭП, так и на системы управления, средства контроля, измерения и сигнализации.

СЭСП со специфической нагрузкой должна быть построена с учетом электромагнитной совместимости (ЭМС), что обеспечивает нормальное функционирование ЭП в данной сети. Для этого существует ряд мероприятий по снижению ЭМП организационного, схемного и технического порядка.

К организационным мероприятиям относится локализация специфической нагрузки. К схемным – построение схемы распределительной сети, обеспечивающей увеличение мощности к. з.

Наибольшее снижение ЭМП достигается применением различных функциональных устройств – фильтров ВГ, симметрирующих устройств, статических компенсаторов, УПК, а также многофункциональных устройств – ФКУ; ФСУ; симметро-фильтрокомпенсирующих. Однако снижение ЭМП до нуля ни технически, ни экономически нецелесообразно. Достаточно довести ПКЭ до уровней, нормируемых ГОСТ 13109-97 на КЭ.

### Статические тиристорные источники реактивной мощности при резкопеременных нагрузках

В настоящее время признано целесообразным управлять режимом потребления реактивной мощности (РМ) с целью регулирования режимом СЭС в нормальных условиях. В распределительной сети 0,4–110 кВ крупных узлов промышленной нагрузки с этой целью устанавливают быстродействующие тиристорные источники РМ, используемые для управления аварийными и послеаварийными режимами питающих сетей.

Расчётами установлено, что изменение суммарной мощности БК на 10–20 % вызовет отклонение напряжения сети ( $\delta U_y$ ), не превышающие 2,5 %.

Регулирующий резерв узла нагрузки определяют с учётом потерь РМ в распределительной сети. На конечный результат окажут влияние потери РМ в трансформаторах связи сетей различного напряжения. Значение входной РМ узла нагрузки изменится на:

$$\Delta Q_o = \sum_{i=1}^n \Delta Q_{эi} + \left( 1 + \frac{2Q_o - \sum_{i=1}^n \Delta Q_{эi} X_{т.о.}}{U^2} \right), \tag{1}$$

где

$$\Delta Q_{эi} = \sum_{k=1}^n \Delta Q_{кj} + \delta Q_{тi} \tag{2}$$

где  $\delta Q_{тi}$  – изменение реактивных потерь в трансформаторах j-х сетевых модулей;

$X_{тo}$  – индуктивность трансформаторов связи с питающей системой;

$Q_{эi}$  – входная экономически целесообразная РМ отдельного сетевого модуля;

$Q_{кj}$  – установленная мощность ИРМ;

$Q_o$  – РМ узла нагрузки.

При комплексном использовании ИРМ в узле нагрузки коэффициент резерва по РМ зависит от соотношения мощностей регулируемой и нерегулируемой частей ИРМ, установленных в СЭС промышленных предприятий.

#### Проблема воздействия мощных вентильных преобразователей на питающую сеть

Обязательным элементом регулируемых электроприводов являются вентильные преобразователи (ВП). Использование в схемах мощных вентильных преобразователей обостряет проблему их электромагнитной совместимости с другими электроприёмниками СЭС, осложняет вопросы КЭ и её эффективного использования, а также требует оценки их воздействия на питающую сеть.

Эксплуатация регулируемого вентильными преобразователями электропривода требует экономически обоснованных мероприятий по улучшению КЭ и её экономии.

Принципиальная схема электроснабжения регулируемого вентильными преобразователями электропривода приведена на рис. 3.

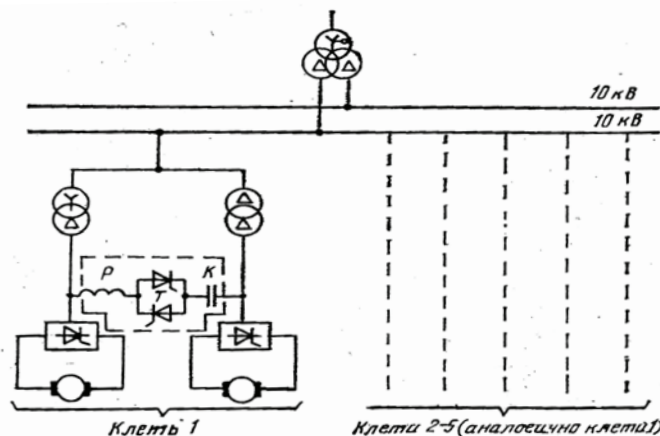


Рис.3 Принципиальная схема электроснабжения регулируемого вентильного преобразователя электропривода

Так как ВП являются симметричной трёхфазной нагрузкой, то при анализе воздействия ВП на питающую сеть учитывают следующие ПКЭ: отклонение напряжения в установившемся режиме ( $\delta U_y$ ), размах изменения напряжения ( $\delta U_t$ ) и коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения ( $K_U$ ), а также площадь коммутационных искажений ( $j_\delta$ ) кривой питающего напряжения.

Отклонение напряжения и размах изменения напряжения определяют по выражению:

$$\delta U_y = \Delta Q_{ВП} / S_{к.з.} \quad (3)$$

$$\delta U_t = \Delta Q_{ВПп} / S_{к.з.}, \quad (4)$$

где  $\Delta Q_{ВП}$ ,  $\Delta Q_{ВПп}$  – приращение РМ в установившемся и переходном режимах. Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения определяют:

$$K_U = x_{S*} \sqrt{\frac{3}{\Pi} \frac{\sin \varphi_{1i}}{x_{S*} + x_{n*i}} - \frac{9}{\Pi^2}} \quad (5)$$

где  $X_{S*}, X_{П*}$  – приведенные сопротивления питающей системы и преобразовательного трансформатора;

$\varphi_{1i}$  – угол сдвига между основными гармониками напряжения и тока, потребляемого ВП.

Глубину  $\delta$  и длительность  $\gamma$  коммутационных искажений, вносимых ВП, рассчитывают по соотношениям:

$$\delta = \frac{X_{S*}}{X_{S*} + X_{П*i}} \sin \varphi_{1i} \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{x_{S*} + X_{n*}}{\sin \varphi_{1i}} \quad (7)$$

Анализ результатов расчётов приводов (от 12 до 30 МВт) свидетельствует о том, что показатели качества напряжения существенно превышают допустимые нормы, при этом коэффициент мощности преобразователей низкий (0,18-0,36). Установка характеризуется повышенным потреблением РМ, что связано со значительными потерями электроэнергии в элементах сети и преобразовательных трансформаторах.

Потери электроэнергии, вызванные перетоками РМ, рассчитывают по формуле:

$$\mathcal{E} = \Delta P \cdot K_B \cdot T_G, \quad (8)$$

где  $\Delta P$  – активные потери в элементах сети и преобразовательных трансформаторах;

$K_B$  – коэффициент включения электропривода;

$T_G$  – годовое число часов работы установки.

Значение  $\Delta P$  определяют по выражению:

$$\Delta P = \left( \frac{Q_{ср.кв}}{U_{л}} \right)^2 (R_s + R_n), \quad (9)$$

где  $Q_{ср.кв.}$  – среднеквадратичное значение РМ, потребляемой ВП;

$R_s, R_n$  – активные сопротивления соответственно питающей сети и преобразовательного трансформатора, приведенные к линейному напряжению.

В сетях с вентильной нагрузкой убытки от активных потерь, вызванных перетоками РМ, значительны. Это требует дополнительных мер по компенсации РМ преобразователей.

Анализ нескольких вариантов схем КРМ свидетельствует о целесообразности использования схемы индивидуальной компенсации РМ отдельных ВП батареями

конденсаторов К (Рис.3), присоединяемых к вентильным обмоткам преобразовательных трансформаторов с помощью тиристорных ключей Т (рис. 3). Для защиты БК от ВГ предусмотрены низковольтные реакторы Р (рис. 3). Принципиальная однолинейная схема компенсирующего устройства для двухмостового ВП приведена на рис. 3 (обведена пунктиром).

Эффективным способом снижения потерь электроэнергии и улучшения КЭ является индивидуальная КРМ ВП конденсаторными батареями, присоединяемые к вентильным обмоткам преобразовательных трансформаторов и коммутируемых бесконтактными тиристорными ключами.

### Выводы

Сложность реализации использования статических компенсирующих устройств для снижения потерь в промышленных сетях заключается в многоплановости электромагнитных помех при эксплуатации электроприемников со специфическими нагрузками, требующими использования постоянно совершенствующихся многофункциональных компенсирующих устройств, что связано с необходимостью совершенствования знаний в области динамически развивающейся отрасли силовой электроники.

### Список использованной литературы:

1. Пospelov Г. Е. Потери мощности и энергии в электрических сетях Г. Е.Пospelov, Н. М. Сыч; под ред Г. И. Пospelova. – М.: Энергоиздат.1981. – С. 20–29.
2. Синьков В. М.Снижение технологического расхода электроэнергии в трансформаторных подстанциях В. М. Синьков, И. П. Притока, А. А. Омельчук и др . – Киев : Техника.1987. – С. 14–1.5
3. Жежеленко И. В. Технические и организационные вопросы повышения качества электроэнергии в промышленных сетях / И. В. Жежеленко, А. М. Липский, Г. Л. Багиев //Промышленная энергетика, № 9, 1983. – С. 12–15.
4. Карташов И. И.Статические тиристорные источники реактивной мощности в узлах нагрузки электроэнергетических систем/ И. И. Карташов, В. И. Чехов// Промышленная энергетика, № 9, 1988. – С. 10–11.
5. Кочкин В. Статические компенсирующие устройства /В. Кочкин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, № 1, 2012. – С. 26–27.
6. Журавлев Д. В. Экономическая эффективность трансформаторно-реакторного устройства при повышении качества электрической энергии. /Д. В. Журавлев // Энергетика та електрифікація, № 8, 2013. – С. 20-21.

### References:

- 1.Pospelov G. E. Power and energy losses in electric networks [Poteri moshchnosti i energii v elektricheskikh setyakh] G. E. Pospelov, N. M. Sych; ed G. I. Pospelova. – М.: Energoizdat. 1981. – P. 20–29.
2. Sinkov V. M. Snizhenie technological power consumption in the transformer substations [Snizheniye tekhnologicheskogo raskhoda elektroenergii v transformatornykh podstantsiyakh] V. M.Sinkov, I. P. Pritoka, A.A. Omelchuk . – Kiyv: et al: Tehnika.1987. – P. 14–15.
3. Zhezhelenko I. V. Technical and organizational issues to improve the quality of electricity in industrial networks [Tekhnicheskkiye i organizatsionnyye voprosy povysheniya kachestva elektroenergii v promyshlennykh setyakh] / I. V. Zhezhelenko, A.M. Lipsky, G. L. Bagiev // Industrial Energy, № 9,1983. – P. 12–15.
4. Kartashov I. I. Statische thyristor reactive power sources at the nodes of the load electric power systems[Statische thyristornyye istochniki reaktivnoy moshchnosti v uzлах nagruzki elektroenergeticheskikh sistem] /I. I. Kartashov,V. I. Czechs // Industrial Energy, № 9, 1988. – P. 10–11.
5. Kochkin B. Static compensating devices [Statische kompensiruyushchiye ustroystva] / V. Kochkin// East European Journal of advanced technologies, № 1, 2012. – P. 26–27.
6. D. V. Zhuravlev. Economic efficiency transformer and reactor unit at improving the quality of electrical energy [Ekonomicheskaya effektivnost' transformatorno-reaktornogo ustroystva pri povyshenii kachestva elektricheskoy energii] / D. V. Zhuravlev // Energetics that elektrifikatsiya, № 8, 2013. – P. 20–21.

Поступила в редакцию 07.04 2015 г.