

# Сравнительный анализ применения конденсаторных установок и компенсационных преобразователей при компенсации реактивной мощности

Бригадин С.И., Зайцев А.И.

Воронежский государственный технический университет

г. Воронеж, Российская Федерация

[brigadins@gmail.com](mailto:brigadins@gmail.com), [ai\\_zaycev@mail.ru](mailto:ai_zaycev@mail.ru)

**Аннотация.** В работе анализируются основные достоинства и недостатки устройств компенсации реактивной мощности, рассматриваются способы максимальной экономии электроэнергии, методы снижения потерь активной мощности и повышения качества электроэнергии в точках потребления. Рассмотрев основные положительные и отрицательные стороны конденсаторных батарей, можно выделить, что они являются наиболее экономичным источником реактивной мощности, при наличии их на предприятии. При этом неблагоприятное влияние на их работу оказывает наличие в их цепях высших гармоник. Также отсутствие плавного автоматического регулирования отдаваемой в сеть реактивной мощности, пожароопасность, наличие остаточного заряда. Все это вынуждает искать более надежные средства компенсации реактивной мощности. Таковыми являются компенсационные выпрямители, в которых можно выделить следующие особенности: большое количество IGBT транзисторов и возможность возникновения на закрытых транзисторах перенапряжений, сложность системы управления, наличие электролитических конденсаторов, простота монтажа и установки на объекте, низкие собственные потери активной мощности, высокое быстродействие, наличие узла защиты от резонансных явлений, плавная регулировка величины компенсации реактивной мощности обоих знаков, совмещенный функций питания технологических установок и генерации реактивной мощности, способность к длительной эксплуатации без обслуживающего персонала.

**Ключевые слова:** компенсационные выпрямители, конденсаторные установки, энергоэффективность, энергосбережение.

## ВВЕДЕНИЕ

Задачи максимальной экономии всех видов ресурсов и повышение качества промышленной продукции являются на современном этапе наиболее актуальными. В области электроэнергетики эти задачи сводятся к снижению потерь электроэнергии в сетях и повышению ее качества в точках потребления.

Наиболее эффективным способом снижения потерь является установка в сетях компенсирующих устройств.

Электроэнергия является единственным видом продукции, транспортировку которой осуществляют за счет расхода определенной части самой продукции, поэтому потери электроэнергии при ее передаче неизбежны.

Однако кроме этого “необходимого технологического расхода” во всех элементах системы электроснабжения (в том числе и сетях энергосистемы) возникают существенные дополнительные потери активной мощности и энергии, обусловленные загрузкой их реактивной мощностью, передаваемой потребителям. Именно поэтому основным мероприятием снижения потерь является установка устройств компенсации реактивной мощности (КРМ) в электрических сетях и, в первую очередь, – в сетях потребителей [1-4].

## КОНДЕНСАТОРНЫЕ БАТАРЕИ

В настоящее время основным средством компенсации реактивной мощности на предприятиях являются батареи силовых конденсаторов, подключаемые параллельно к электросети (поперечная компенсация). Достоинствами конденсаторных установок являются: простота, относительно невысокая стоимость, не дефицитность материалов, малые удельные собственные потери активной мощности.

Конденсаторы являются наиболее экономичным источником реактивной мощности, так как имеют наименьшие потери по сравнению с другими источниками. Поэтому выгодно наиболее полное их использование во времени.

Недостатки: отсутствие плавного автоматического регулирования отдаваемой в сеть реактивной мощности, пожароопасность, наличие остаточного заряда.

Неблагоприятное влияние на работу конденсаторных установок оказывает наличие в их цепях высших гармоник. Поэтому при проектировании конденсаторных установок необходимо проверять вероятность наступления резонанса одной из высших гармоник, а иногда и резонанс на основной гармонике, которая может вызвать недопустимое увеличение тока в конденсаторной установке и ее повреждение. Такая проверка, в частности, необходима при размещении конденсаторов вблизи особенно активных источников высших гармоник: дуговые электропечи, выпрямительные установки, тяговые подстанции, электролизные установки.

Для преодоления некоторых недостатков на практике для получения эффекта регулирования конденсаторных установок реактивной мощности прибегают к шунтирова-

нию их регулируемой индуктивностью в различных комбинациях под названием “статические компенсаторы”.

Однако, следует отметить, что параллельно подключаемая регулируемая индуктивность имеет нелинейную характеристику, за счет которой потребляемый ток будет содержать высшие гармоники. Эти гармоники будут замыкаться в конденсаторе, и перегружать его по току, снижая надежность.

Существенным фактором снижения надежности конденсаторов являются возникающие перенапряжения [5-8]. Низкая стойкость конденсаторов по отношению высших гармоник и к перенапряжениям в питающей сети подтверждает необходимость поиска альтернативных источников реактивной мощности.

#### КОМПЕНСАЦИОННЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Достижения в области силовой электроники открывают большие возможности по созданию регулируемых вентильных преобразователей, на базе которых наблюдается наибольший экономический эффект снижения потерь активной энергии при совмещении в одном устройстве функций обеспечения электроэнергией технологического процесса и генерации реактивной мощности. К числу таких устройств относят компенсационные выпрямители с принудительной коммутацией. На базе полностью управляемых силовых вентилей с принудительной (искусственной) коммутацией появилась возможность создания управляемых выпрямителей с новыми свойствами – наряду с питанием технологического процесса генерация реактивной мощности емкостного характера. Такие выпрямители названы компенсационными.

В общем случае устройство компенсационного преобразователя представлено на рис. 1 и должно реализовать совокупность следующих функциональных операций:

- собственно преобразования рода тока;
- регулирования параметров преобразованной энергии (постоянной составляющей в цепях постоянного тока, первой гармоники в цепях переменного тока);
- согласования уровней напряжения источника питания и нагрузки преобразователя;
- электромагнитной совместимости преобразователя с источником питания и нагрузкой.

Для решения этой цели применена методология системного подхода к решению задачи создания управляемых компенсационных преобразователей двойного назначения: питание технологических установок и генерация реактивной мощности емкостного характера для компенсации реактивной мощности индуктивного характера.

Применительно к предлагаемым устройствам энергетики указанные принципы системного подхода заключаются в следующем:

- рассматривается не само по себе устройство преобразования электрической энергии из одного вида в другой, а в совокупности с источником питания на входе и нагрузкой (потребителем) на выходе;
- выявляются все виды способов преобразования электрической энергии в соответствии с их назначением;
- определяется необходимый набор критериев качества создания и функционирования устройств – энергетиче-

ских критериев качества устройств и их режимов работы и рассматриваются существующие методы их расчета.

Положительными особенностями компенсационного выпрямителя являются:

- обеспечивается выполнение действующих российских и зарубежных стандартов по электромагнитной совместимости с питающей сетью;
- при всех углах управления происходит генерация реактивной мощности емкостного характера;
- при параллельной работе этих выпрямителей с потребителями реактивной мощности индуктивного характера в узле нагрузки питающая сеть разгружается от перетока реактивной мощности.

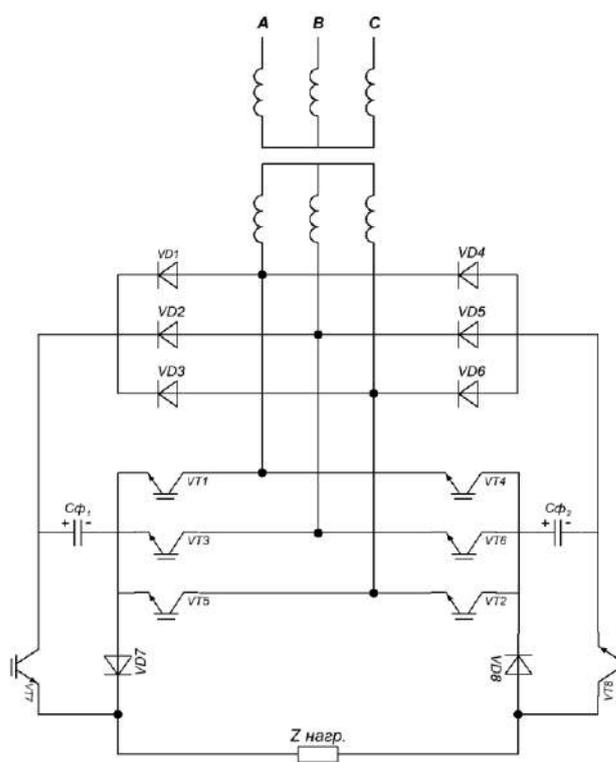


Рис. 1. Принципиальная схема компенсационного преобразователя

В результате при применении компенсационных преобразователей питающая сеть будет разгружаться от перетока реактивной мощности на всей протяженности линий, трансформаторов от источника питания до места потребления. При этом, кроме экономии активной электроэнергии, происходит разгрузка распределительных сетей, дающая возможность увеличения их пропускной способности, а так же эффект высвобожденной генерирующей мощности на электростанции.

Получены новые свойства – питать технологическую нагрузку и возможность генерировать реактивную мощность емкостного характера при опережающих углах управления в анодной и катодной группах, либо при всех режимах, имея  $\cos\varphi \approx 1$  при раздельном управлении, например, катодная группа работает с опережающими, а анодная – с отстающими углами управления.

Дополнительно данный преобразователь оснащен устройством, состоящим из маломощного неуправляемого выпрямителя на диодах VD1-VD6, катодного Сф1 и анодного Сф2 фильтров, вспомогательных транзисторов VT7 и VT8 и диодов VD7 и VD8.

Выбор элементной базы преобразователей рассматриваемого класса осуществляется с учетом преобразуемой мощности. Преобразователь с искусственной коммутацией должен быть выполнен на базе выпрямительного блока, представленного на базе полностью управляемых вентилей IGBT, IGCT, GTO, осуществляющих коммутацию по цепи управления. Для возникающих перенапряжения разработано устройство защиты от коммутационных перенапряжений (УЗП) на базе маломощного неуправляемого выпрямителя, двух конденсаторов Сф1 и Сф2 и транзисторов VT7 и VT8.

Назначением УЗП является вывод из контура коммутации фазных токов избытка электромагнитной энергии, выделяющейся на индуктивных элементах в момент записывания вентилей [9-14]. Необходимо отметить, что до сих пор наибольшее применение находят УЗП, работающие по принципу рассеивания энергии, взятому из практики преобразователей с естественной коммутацией вентилей [15].

Отличительные особенности многофазных выпрямителей на базе полностью управляемых вентилей GTO, IGCT, IGBT и других заключаются в способе управления моментом времени включения силового вентиля в каждой фазе по отношению точки естественной коммутации и в электромагнитных процессах, протекающих во время коммутации силовых вентилей.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенная сравнительная оценка различных компенсирующих устройств показывает, что применяемые в настоящее время батареи силовых конденсаторов с известным недостатком – чувствительность к высшим гармоникам (иногда приводящее к резонансам по одной из высших гармоник), дополнительно способствуют появлению перенапряжения в питающей сети. В результате трансформаторы работают в режиме сильного насыщения магнитопроводов и способствуют появлению резонансов тока даже на основной гармонике, а иногда и возникают автоколебательные процессы при резкой несимметрии напряжений сети, например, при обрыве фазы.

Эти явления существенно снижают надежность работы системы электроснабжения. Наибольший эффект достигается при применении компенсационных выпрямителей, в которых можно совместить функции обеспечения электроэнергией технологического процесса и генерации реактивной мощности емкостного или индуктивного характера.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Железко Ю.С. О нормативных документах в области качества электроэнергии и условий потребления реактивной мощности // *Электрика*. – 2003. – № 1. – С. 9-16.

2. Железко Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях: руководство для практических расчетов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 176 с.

3. Железко Ю.С. Расчет анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко, А.В. Артемьев, О.В. Савченко. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 280 с.

4. Шишкин С.А. Определение эффективности использования конденсаторных установок в электросетях сельскохозяйственных предприятий // *Электрика*. – 2002. – № 11. – С. 9-11.

5. Базуткин В.В. Техника высоких напряжений: изоляция и перенапряжения в электрических системах: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.

6. Цапенко Е.Ф. Перенапряжения в системе электро-снабжения. – М.: Издательство Московского государственного университета, 2002. – 64 с.

7. Цапенко Е.Ф. Перенапряжения в сети 0,4 кВ при однофазном замыкании на корпус трансформатора на стороне 6-10 кВ // *Промэнергетика*. – 1974. – № 3.

8. Кучумов Л.А. Методы расчета высших гармоник в токах намагничивания понижающих трансформаторов / Л.А. Кучумов, А.А. Кузнецов, И.Н. Харламов, Н.Н. Картаиде // *Электричество*. – 1998. – № 3.

9. Арион В.Д. Оптимизация систем электроснабжения в условиях неопределенности / В.Д. Арион, В.С. Каратун, П.А. Пасинковский – Кичнев: Штиница, 1991. – 160 с.

10. Иванов Г.М. Автоматизированный электропривод механизмов химической промышленности / Г.М. Иванов, Г.Б. Онищенко. – М.: Машиностроение, 1975.

11. Колосов В.И. Определение кратности пускового момента асинхронного двигателя, регулируемого частотой // *Электротехника*. – 1974. – № 4.

12. Жежеленко И. В. Показатели качества электроэнергии на промышленных предприятиях. – М.: Энергия, 1977. – 128 с.

13. Забродин Ю.С. Трансформаторный вывод избыточной энергии из контура коммутации в тиристорных инверторах напряжения / Ю.С. Забродин В.А. Лабунцов // *Электротехническая промышленность. Сер. Преобразовательная техника*. – 1970. – Вып. 9-10. – С. 9-12.

14. Осипов П.П. Цилиндрический линейный асинхронный привод с частотным управлением: автореф. дис. канд. техн. наук. – СПб, 2002. – 16 с.

15. Барино В. А. Автоматизация диспетчерского управления в электроэнергетике. – Москва, МЭИ, 2000. – 647 с.

# Comparative Analysis of the Application of the Capacitor Units and Compensation Converters with Reactive Power Compensation

Brigadin S.I., Zaitsev A.I.

Voronezh State Technical University

Voronezh, Russian Federation

[brigadins@gmail.com](mailto:brigadins@gmail.com), [ai\\_zaitsev@mail.ru](mailto:ai_zaitsev@mail.ru)

**Abstract.** This paper analyzes the main advantages and disadvantages of reactive power (RP) compensation devices, discusses how the maximum energy saving, reduction methods of active power losses and improve the power quality at the points of consumption. After examining the main positive and negative sides of capacitor banks, to emphasize that they are the most economical source of reaction-stive power in the presence of their enterprise. At the same adverse effect on their work has on-presence in their chains of higher harmonics. Also, the lack of a smooth automatic regulation of given network reactive power, fire, the presence of residual charge. All this forces them to seek a more reliable means of reactive power compensation. These are compensatory rectifiers, which are the following features: a large number of the IGBT and the possibility of a surge in private transistors, the complexity of the control system, the presence of electrolytic capacitors, ease of installation and on-site installation, low internal losses of active power, high performance, availability node protection of resonance phenomena, smooth adjustment of the compensation value of the RP of both signs, combining the functions of power generation and process plants RP ability to long-term operation without personnel.

**Keywords:** compensating rectifiers, condenser installations, energy efficiency, energy saving.

## REFERENCES

1. Zhelezko Yu.S. On normative documents in the field of power quality conditions and reactive power consumption [O normativnykh dokumentakh v oblasti kachestva elektroenergii i usloviy potrebleniya reaktivnoy moshchnosti], *Elektrika [Electrics]*, 2003, no. 1, pp. 9-16.
2. Zhelezko Yu.S. *Vybor meropriyatiy po snizheniyu poter' elektroenergii v elektricheskikh setyakh: rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov* [The choice of measures to reduce energy losses in electric networks: a guide for practical calculations], Moscow, Energoatomizdat, 1989, 176 p.
3. Zhelezko Yu.S., Artem'yev A.V., Savchenko O.V. *Raschet analiz i normirovaniye poter' elektroenergii v elektricheskikh setyakh: rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov* [Calculation analysis and valuation losses in electrical networks: a guide for practical calculations], Moscow, NTs ENAS Publ., 2002, 280 p.
4. Shishkin S.A. Determination of the effectiveness of the use of capacitor units in electric farms [Opredeleniye effektivnosti ispol'zovaniya kondensatornykh ustanovok v elektrosetyakh sel'skokhozyaystvennykh predpriyatiy], *Elektrika [Electrics]*, 2002, no. 11, pp. 9-11.
5. Bazutkin V.V. *Tekhnika vysokikh napryazheniy: izolyatsiya i perenapryazheniya v elektricheskikh sistemakh: uchebnik dlya vuzov* [High-voltage engineering: isolation and surge in electrical systems: a textbook for high schools], Moscow, Energoatomizdat, 1986, 464 p.
6. Tsapenko E.F. *Perenapryazheniya v sisteme elektroshabzheniya* [Overvoltage in the electrical system.], Moscow, MGU publ., 2002, 64 p.
7. Tsapenko E.F. Surge in the 0.4 kV network with a single-phase ground fault transformer on the side of 6-10 kV [Perenapryazheniya v seti 0,4 kV pri odnofaznom zamykanii na korpus transformatora na storone 6-10 kV], *Promenergetika [Industrial Energy]*, 1974, no 3.
8. Kuchumov L.A., Kuznetsov A.A., Kharlamov I.N., Kartaide N.N. Methods for calculating the higher harmonic currents in the magnetizing step-down transformers [Metody rascheta vysshikh garmonik v tokakh namagnichivaniya ponizhayushchikh transformatorov], *Elektrichestvo [Electricity]*, 1998, no. 3.
9. Arion V.D., Karatun V.S., *Pasinkovskiy P.A. Optimizatsiya sistem elektroshabzheniya v usloviyakh neopredelennosti* [Optimization of power systems under uncertainty], Kishenev, Shtinita, 1991, 160 p.
10. Ivanov G.M., Onishchenko G.B. *Avtomatizirovannyy elektroprivod mekhanizmov khimicheskoy promyshlennosti* [Automated electric drive mechanisms of chemical industry], Moscow, Mashinostroyeniye, 1975.
11. Kolosov V.I. Determination of the multiplicity of the starting torque of the induction motor, variable frequency [Opredeleniye kratnosti puskovogo momenta asinkhronnogo dvigatelya, reguliruyemogo chas-totoy], *Elektrotekhnika [Electrical engineering]*, 1974, no. 4.
12. Zhezhelanko I.V. *Pokazateli kachestva elektroenergii na promyshlennykh predpriyatiyakh* [Power quality in industrial enterprises], Moscow, Energiya, 1977, 128 p.
13. Zabrodin Yu.S., Labuntsov V.A. Transformer withdrawal of excess energy from the circuit switching thyristor inverter voltage [Transformatornyy vyvod izbytochnoy energii iz kontura kommutatsii v tiristornykh invertorakh napryazheniya], *Elektrotekhnicheskaya promyshlennost'. Ser. Preobrazovatel'naya tekhnika [Electrical industry. Series converters]*, 1970, vol. 9-10, pp. 9-12.
14. Osipov P.P. *Tsilindricheskii lineynyy asinkhronnyy privod s chastotnym upravleniyem: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Cylindrical linear induction motor drive with speed control: the Author's abstract of PhD], SPb, 2002, 16 p.
15. Barino V.A. *Avtomatizatsiya dispetcherskogo upravleniya v elektroenergetike* [Automation supervisory control in the electric power], Moscow, MEI Publ., 2000, 647 p.