

УСТАНОВКИ ПОПЕРЕЧНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ ДЕМПФИРОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ РЕЖИМОВ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Довгун В.П.¹, Егоров Д. Э.¹, Новиков В. В.¹, Синяговский А. Ф.¹

¹Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Резюме: ЦЕЛЬ. Серьезной проблемой конденсаторных установок, используемых в системах электроснабжения для компенсации реактивной мощности, является резонансное усиление гармоник, создаваемых нелинейными нагрузками, а также перенапряжения, возникающие при коммутациях в сети. Для защиты установок от перенапряжений и влияния гармоник последовательно с батареей конденсаторов (БК) включают демпфирующие звенья. В статье рассмотрены установки поперечной емкостной компенсации с демпфирующими звеньями в форме лестничного LC-четырёхполюсника. Помимо компенсации реактивной мощности установки осуществляют фильтрацию гармоник и демпфирование переходных процессов, вызванных коммутациями в сети. МЕТОДЫ. Разработана процедура расчета демпфирующих звеньев лестничной структуры для установок поперечной емкостной компенсации, основанная на оптимизации частотной характеристики в пространстве параметров элементов демпфирующего звена. Определены условия, при которых звено обеспечивает демпфирование резонансных режимов, возникающих в параллельном контуре, образованном компенсирующим конденсатором и индуктивностью сети. С помощью предложенной процедуры расчета определены параметры звеньев различного порядка, осуществляющих демпфирование переходных процессов при коммутациях и фильтрацию гармоник, создаваемых нелинейными нагрузками. РЕЗУЛЬТАТЫ. Сравнительный анализ характеристик компенсирующих установок с различными вариантами демпфирующих звеньев показал, что установки с демпфирующими звеньями лестничной структуры эффективно ослабляют тяжелые переходные процессы, возникающие при коммутациях в сети, а также обеспечивают фильтрацию гармоник в широком диапазоне частот. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В системах электроснабжения с большой долей нелинейных нагрузок необходимы установки поперечной емкостной компенсации, обеспечивающие демпфирование резонансных режимов и ослабление гармоник, создаваемых нелинейными нагрузками. Эти функции выполняют демпфирующие звенья, включаемые последовательно с батареей конденсаторов. В статье рассмотрены новые варианты демпфирующих звеньев в форме реактивных четырёхполюсников, ослабляющих перенапряжения при переходных процессах и уменьшающих гармонические искажения токов и напряжений.

Ключевые слова: установки поперечной емкостной компенсации; гармоники; резонансные режимы в системах электроснабжения.

Для цитирования: Довгун В. П., Егоров Д. Э., Новиков В.В., Синяговский А.Ф. Установки поперечной емкостной компенсации, обеспечивающие демпфирование резонансных режимов в системах электроснабжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 4. С. 3-14. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-77-89.

SHUNT POWER FACTOR CORRECTION DEVICES FOR DAMPING OF HARMONIC RESONANCE IN INDUSTRIAL POWER SYSTEMS

Dovgun VP¹, Egorov DE¹, Novikov VV¹, Sinjagovsky AF¹

¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract: THE PURPOSE. Harmonic resonance has become a serious problem of shunt capacitor banks for reactive power and voltage support. Effective solution to damp out the

capacitor-caused resonance is the series connection of capacitor bank with harmonic damping network. This paper presents a general design method for shunt capacitive compensating units with damping networks. The damping unit is designed in such a way that it provides harmonic filtering and adequate damping of the transient oscillations. **METHODS.** The method was developed for designing damping network in the form of ladder LC-two-port. The design is based on minimization of voltage total harmonic distortion (VTHD) in the point of common coupling. Normalized element parameters of the different order damping networks have been determined. **RESULTS.** Comparative study of transient behavior of shunt capacitive compensating units with damping networks illustrate the effectiveness of the propose structure. It has been observed that there is a significant reduction of transient overvoltage in switching of capacitor bank with damping network. **CONCLUSION.** This paper presents a new design method for capacitive compensating units with damping networks for industrial power systems with powerful nonlinear loads. The paper illustrates superior performance characteristics of proposed shunt capacitive compensating units by computer simulations.

Key words: shunt power correction devices; harmonics; resonance in power systems.

For citation: Dovgun VP, Egorov DE, Novikov VV, Sinjagovsky AF. Shunt power factor correction devices for damping of harmonic resonance in industrial power systems. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(4):3-14. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-77-89.

Введение

Конденсаторные установки (КУ) являются простыми и экономичными устройствами, используемыми для коррекции коэффициента мощности. В тех случаях, когда не требуется высокое быстродействие, переключаемые КУ используют для дискретного регулирования реактивной мощности и напряжения в точке подключения.

Серьезный недостаток конденсаторных установок заключается в том, что они имеют повышенную чувствительность к искажениям напряжений и токов, возникающих под влиянием нелинейных нагрузок. Потери мощности в конденсаторах пропорциональны частоте приложенного напряжения, поэтому гармонические искажения напряжения вызывают дополнительный нагрев и преждевременный выход конденсаторов из строя [1, 2]. Кроме того, несинусоидальная форма токов и напряжений сети вызывает снижение компенсирующего эффекта конденсаторных установок [3].

Другая проблема состоит в том, что конденсаторные установки образуют параллельные резонансные контуры с индуктивностью сети, которые могут вызвать усиление отдельных гармоник, а также перенапряжения при переходных процессах, сопровождающих коммутации в системе электроснабжения.

Для защиты конденсаторов от перегрузки токами высших гармоник последовательно с ними включают антирезонансные дроссели. Узкополосный фильтр, образованный батареей конденсаторов и дросселем, настраивают на частоту, близкую к частоте наиболее мощной гармоники. Однако сопротивление узкополосного фильтра имеет индуктивный характер на частотах, превышающих резонансную. Включение в сеть узкополосных фильтров приводит не к подавлению резонансных максимумов сопротивления сети, а к их смещению в область высоких частот.

В работах [4 - 8] предложено использовать устройства поперечной емкостной компенсации, включающие батарею конденсаторов и последовательно включенное демпфирующее звено, имеющее частотно-зависимое активное сопротивление $R(\omega)$. В качестве такого звена в [4, 6, 7, 9, 10] использован двухполосник, образованный параллельным соединением резистора и последовательного резонансного контура, настроенного на частоту основной гармоники (на рис. 1, а демпфирующий двухполосник выделен пунктиром). Компенсирующая установка (рис. 1, а) повторяет конфигурацию широкополосного фильтра С-типа, используемого для ослабления гармоник и коррекции частотных характеристик сети [5, 6, 9 - 12]. В [5, 8] установки поперечной емкостной компенсации на рисунке 1 названы демпфированными конденсаторами (damped capacitor). Частотная характеристика сопротивления широкополосного фильтра показана на рис. 1, б. Здесь ω_H – частота настройки, на которой сопротивление широкополосного фильтра имеет минимальное значение.

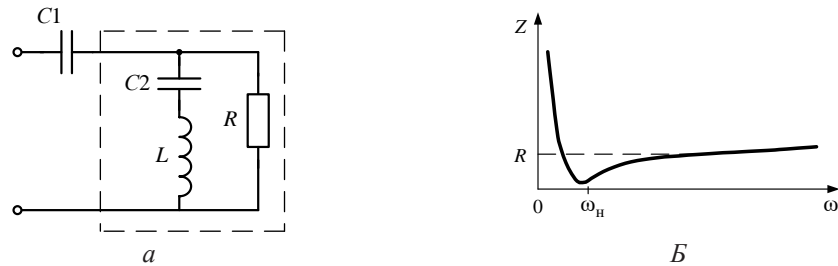


Рис. 1. Установка поперечной емкостной компенсации с демпфирующим звеном С-типа (а). Частотная характеристика широкополосного фильтра (б)

Fig. 1. Shunt capacitor with C-type damping unit (a). Broad-band filter frequency response (b)

Установки поперечной емкостной компенсации с демпфирующими звеньями, рассмотренные в [4 - 8], не обладают достаточной селективностью для одновременного подавления мощных низкочастотных гармоник и демпфирования резонансных режимов системы электроснабжения (СЭС). Кроме того, они имеют значительные потери в элементах демпфирующего звена [11]. Для СЭС, питающих мощные нелинейные нагрузки, необходимы более эффективные варианты устройств поперечной емкостной компенсации, обладающие достаточной селективностью для фильтрации гармоник, создаваемых нагрузкой, и коррекции частотных характеристик сети.

В статье рассмотрены новые конфигурации демпфирующих звеньев для установок поперечной емкостной компенсации в форме LC-четырёхполюсников лестничной структуры. Предложена процедура расчета параметров демпфирующих звеньев, основанная на оптимизации частотной характеристики КУ в пространстве параметров элементов звена. С ее помощью определены параметры нормированных демпфирующих звеньев второго-четвертого порядка. Установки обеспечивают компенсацию реактивной мощности, фильтрацию гармоник, создаваемых нелинейными нагрузками, демпфирование переходных процессов, вызванных коммутациями в сети. Анализ характеристик предлагаемых устройств показал, что они обладают существенными технико-экономическими преимуществами по сравнению с известными конфигурациями демпфированных конденсаторов на основе фильтров С-типа.

Литературный обзор

Конденсаторная установка и индуктивность сети образуют параллельный колебательный контур, способный вызвать резонансное усиление гармоники, частота которой определяется выражением [12]

$$f_h = f_1 \sqrt{\frac{S_{K3}}{S_{KY}}}, \quad (1)$$

где S_{KY} – мощность КУ, S_{K3} – мощность трехфазного короткого замыкания сети, h – порядковый номер гармоники.

Установка поперечной емкостной компенсации с демпфирующим звеном на рис. 1 представляет собой широкополосный силовой фильтр, осуществляющий компенсацию реактивной мощности, ослабление гармоник, создаваемых нелинейными нагрузками, а также демпфирование резонансных режимов в сети. Для снижения потерь мощности на частоте основной гармоники ω_1 активное сопротивление демпфирующего звена $R(\omega_1)$ должно иметь минимальное значение. В то же время в диапазоне высокочастотных гармоник значение $R(\omega)$ должно быть достаточно большим для демпфирования резонансных режимов в системе внешняя сеть–компенсирующее устройство.

Комплексное сопротивление демпфирующего звена в фильтре С-типа (рис. 1, а) определяется выражением

$$Z_d(j\omega) = \frac{-\omega^2 + \frac{1}{LC_2}}{-\omega^2 + j\omega \frac{R}{L} + \frac{1}{LC_2}} R.$$

Поскольку контур LC_2 настроен в резонанс на частоту основной гармоники, модуль сопротивления $Z_d(j\omega)$ имеет минимальное значение на этой частоте. В диапазоне высоких частот сопротивление демпфирующего звена определяется сопротивлением резистора R .

В [13 - 16] рассмотрены процедуры расчета широкополосных фильтров *C*-типа, предназначенных для компенсации реактивной мощности и ослабления гармоник, создаваемых нелинейными нагрузками. Мощность компенсирующей установки определяется емкостью основного конденсатора C_1 . Расчет демпфирующего звена на рис. 1, *a* сводится к определению индуктивности реактора L , емкости вспомогательного конденсатора C_2 и сопротивления демпфирующего резистора R . Емкость вспомогательного конденсатора

$$C_2 = C_1 \left(\left(\frac{\omega_H}{\omega_1} \right)^2 - 1 \right).$$

Индуктивность реактора демпфирующего звена определяется по формуле

$$L = \frac{1}{\omega_1 C_1}.$$

В [16] предложено простое соотношение для определения сопротивления демпфирующего резистора

$$R = \frac{\omega_H L}{Q}.$$

Здесь Q – добротность широкополосного фильтра.

Проектирование фильтров *C*-типа, осуществляющих, помимо коррекции коэффициента мощности и ослабления гармоник, демпфирование резонансных режимов, рассмотрено в [5, 6, 9, 10]. В [5, 6] для оценки демпфирующих свойств широкополосных фильтров предложено использовать коэффициент усиления гармоник (harmonic amplification ratio – *HAR*), определяемый выражением

$$HAR(\omega) = \left| \frac{U_{KY}(j\omega)}{U_{KY}^0(j\omega)} \right| = \left| \frac{Z_{KY}(j\omega)}{Z_C(j\omega) + Z_{KY}(j\omega)} \right|. \quad (2)$$

Здесь $U_{KY}^0(j\omega)$, $U_{KY}(j\omega)$ – напряжение в точке общего присоединения соответственно до и после подключения компенсирующего устройства;

$Z_C(j\omega) = R_C(\omega) + jX_C(\omega)$ – комплексное сопротивление сети;

$Z_{KY}(j\omega) = R_{KY}(\omega) + jX_{KY}(\omega)$ – комплексное сопротивление компенсирующего устройства.

Коэффициент усиления гармоник, определяемый формулой (2), равен модулю коэффициента передачи тока нагрузки во внешнюю сеть:

$$K_I(\omega) = \frac{I_C}{J} = \left| \frac{Z_{KY}(j\omega)}{Z_C(j\omega) + Z_{KY}(j\omega)} \right|.$$

В [5] показано, что максимальное значение модуль коэффициента усиления гармоник принимает в том случае, если сопротивление сети имеет индуктивный характер и выполняется условие

$$X_C(\omega) = -X_{KY}(\omega).$$

При этом максимальное значение коэффициента усиления гармоник:

$$HAR_{worst}(\omega) = \sqrt{1 + \left(\frac{X_{KY}(\omega)}{R_{KY}(\omega)} \right)^2}. \quad (3)$$

Согласно (3) коэффициент усиления гармоник на частоте ω зависит от отношения реактивного и активного сопротивлений компенсирующего устройства.

Детальный анализ характеристик фильтров *C*-типа, проведенный в [5, 9], показал, что они обеспечивают демпфирование резонансных режимов на частотах, превышающих ω_H , если реактивное сопротивление $X_{KY}(\omega_H) = 0$ и выполняется условие

$$C_2 \geq \frac{\left(\left(\frac{\omega_H}{\omega_1} \right)^2 - 1 \right)}{\left(\frac{\omega_H}{\omega_1} \right)^2} C_1.$$

Сопротивление демпфирующего резистора вычисляется по формуле

$$R = \frac{\left(\frac{\omega_H}{\omega_1}\right)^2 - 1}{\omega_H \sqrt{\left(\left(\frac{\omega_H}{\omega_1}\right)^2 - 1\right) C_1 C_2 - C_2^2}}.$$

Частотную характеристику сопротивления фильтра С-типа можно варьировать с помощью единственного параметра – сопротивления демпфирующего резистора R . На рисунке 2 частотные характеристики $Z_{КУ}(j\omega)$ построены для двух значений R , равных 500 и 1000 Ом.

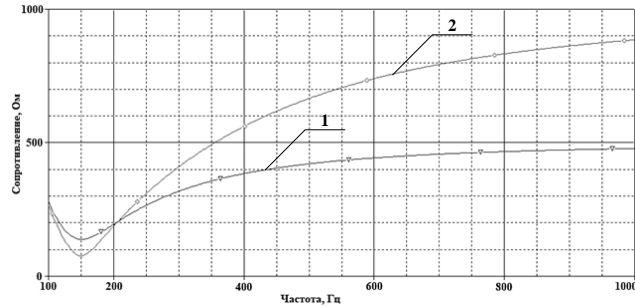


Рис. 2. Частотные характеристики сопротивления фильтра С-типа: 1 – при $R = 500$ Ом; 2 – при $R = 1000$ Ом. *Fig. 2. Frequency response of the C-type filter*

При больших значениях сопротивления демпфирующего резистора обеспечивается фильтрация низкочастотных гармоник, однако это достигается за счет менее эффективного подавления гармоник в диапазоне высоких частот. Таким образом, фильтр С-типа с простейшим демпфирующим звеном первого порядка не обладает достаточной селективностью для одновременной компенсации мощных низкочастотных гармоник и коррекции частотной характеристики сети в широком диапазоне частот. Другим существенным недостатком фильтров С-типа является большая суммарная емкость конденсаторов и, соответственно, большая стоимость. Необходимы более сложные конфигурации демпфирующих звеньев, обеспечивающих фильтрацию мощных низкочастотных гармоник и коррекцию частотных характеристик системы электроснабжения.

Метод расчета демпфирующих звеньев

В качестве базовой структуры демпфирующего звена рассмотрим односторонне нагруженный реактивный четырехполюсник лестничной структуры. Увеличение порядка звена дает дополнительные степени свободы и позволяет получить требуемые характеристики. Такое представление позволяет использовать для расчета методы оптимального синтеза пассивных цепей и получить новые варианты демпфирующих звеньев различного порядка. В качестве примера на рис. 3 показано демпфирующее звено в форме лестничного четырехполюсника четвертого порядка.

Активная проводимость четырехполюсника и его передаточная функция связаны соотношением [17, 18]

$$\operatorname{Re}\{Y(j\omega)\} = G |T_{21}(j\omega)|^2.$$

Здесь $T_{21}(j\omega) = U_2(j\omega)/U_1(j\omega)$ – передаточная функция четырехполюсника,

$Y_{\text{вх}}(j\omega) = 1/Z_{\text{вх}}(j\omega)$ – его входная проводимость.

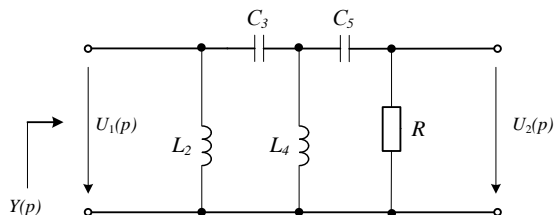


Рис. 3. Реактивный четырехполюсник лестничной структуры *Fig. 3. Ladder LC-two-port*

Для реализации демпфирующих звеньев удобно использовать пассивные LC -четырёхполюсники, реализующие с последовательно включенным основным конденсатором передаточную функцию фильтра верхних частот Баттерворта. Такая компенсирующая установка имеет монотонную частотную характеристику входного сопротивления. Методы синтеза пассивных фильтров хорошо разработаны, поэтому расчет демпфирующего звена заключается в масштабировании элементов нормированного фильтра Баттерворта по заданным частоте настройки и реактивной мощности [19].

Частотные характеристики активного и реактивного сопротивления демпфирующих звеньев 2 и 4 порядка, полученных путем масштабирования элементов фильтров Баттерворта, показаны на рисунке 4, *а*, *б* соответственно.

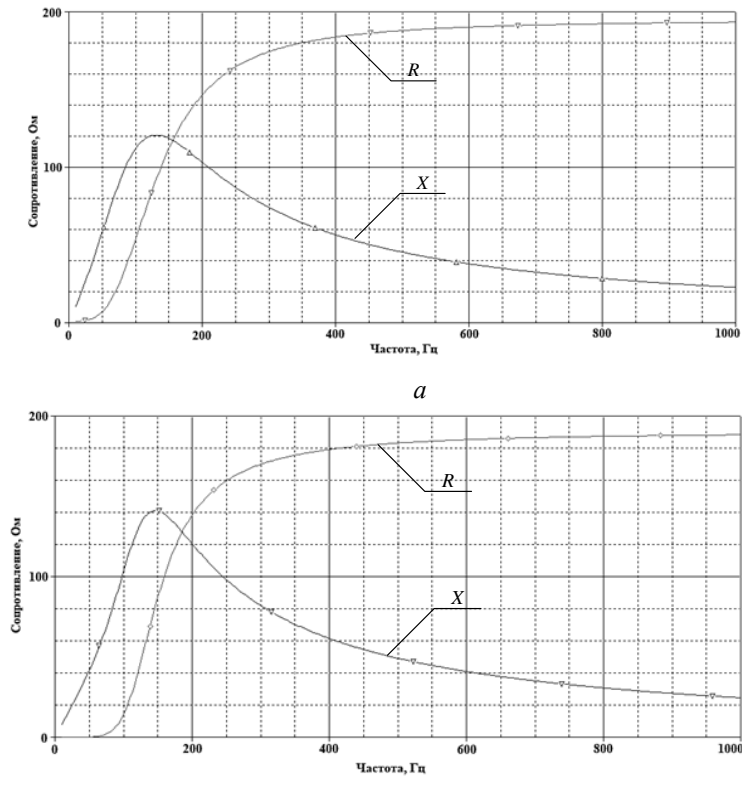


Рис. 4. Частотные характеристики активного и реактивного сопротивления: *а* – демпфирующего звена 2 порядка, *б* – демпфирующего звена 4 порядка.

Fig. 4. Frequency response of damping networks (separate R - X plot) *а* – 2-nd order, *б* – 4-th order

Сравнение характеристик показывает, что увеличение порядка демпфирующего звена сопровождается уменьшением активного сопротивления и снижением потерь мощности на частоте основной гармоники. Можно варьировать селективность частотной характеристики компенсирующей установки, изменяя порядок демпфирующего звена.

Определим параметры демпфирующего звена, при которых исключается резонанс в параллельном контуре, образованном индуктивностью сети и компенсирующей установкой. Из рис 4 *а*, *б* следует, что сопротивление демпфирующего звена на частотах, превышающих ω_H , имеет активно-индуктивный характер. Поскольку в диапазоне высокочастотных гармоник реактивное сопротивление звена невелико, им можно пренебречь и рассматривать компенсирующую установку как широкополосный RC -фильтр первого порядка (на рис. 5 выделен пунктиром).

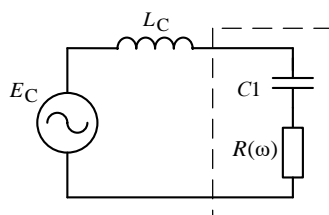


Рис. 5. Модель внешней сети и широкополосного фильтра

Fig. 5. Equivalent circuit of the system and the broad-band filter

Индуктивность сети, конденсатор и демпфирующий двухполюсник в эквивалентной схеме на рисунке 5 образуют параллельный колебательный контур, резонансная частота которого

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_C C_1 - R_{KY}^2(\omega_0) C_1^2}}. \quad (4)$$

Согласно формуле (4) для исключения резонанса в параллельном контуре, образованном индуктивностью сети и емкостью компенсирующего устройства необходимо выполнение условия

$$R_{KY}(\omega) \geq \sqrt{\frac{L_C}{C_1}}. \quad (5)$$

Компенсирующие установки с демпфирующими звеньями лестничной структуры эффективно ослабляют переходные процессы, возникающие в системе при коммутациях. Однако КУ, устанавливаемые в системах электроснабжения промышленных предприятий, должны не только демпфировать резонансные максимумы частотной характеристики сети, но и обеспечивать эффективную фильтрацию гармоник, создаваемых мощными нелинейными электроприемниками. При проектировании компенсирующих установок необходимо учитывать уровень спектральных составляющих тока, а также характеристики внешней сети.

Для определения параметров демпфирующих звеньев, обеспечивающих фильтрацию гармоник и ослабление резонансных режимов, целесообразно использовать методы оптимизации. В качестве главного критерия, подлежащего минимизации, используем суммарный коэффициент гармоник напряжения в точке подключения компенсирующей установки

$$\Phi(\bar{x}) = \frac{|Z_{KY}(j\omega_k, \bar{x}) Z_C(j\omega_k)|^2}{|Z_{KY}(j\omega_k, \bar{x}) + Z_C(j\omega_k)|^2} J_k^2, k = 1, 2, \dots, \bar{x} \in \{L_i, C_i, R\}. \quad (6)$$

Здесь $Z_{KY}(j\omega_k, \bar{x})$ – комплексное сопротивление КУ, $Z_C(j\omega_k)$ – сопротивление сети, J_k – действующее значение тока k -й гармоники. Критерий, определяемый формулой (6) позволяет учитывать при оптимизации спектральный состав тока нелинейной нагрузки и частотные характеристики сети.

Расчет демпфирующего звена заключается в определении параметров реактивных элементов, при которых достигается минимум критерия (6), и одновременно выполняются ограничения, определяющие активную мощность, потребляемую звеном, и способность компенсирующей установки демпфировать резонансные режимы:

$$\frac{\operatorname{Re}\{Y_{BX}(j\omega_1)\}}{|Y_{BX}(j\omega_1)|} \leq \eta_0, \\ R_{KY}(\omega) \geq \sqrt{\frac{L_C}{C_1}}.$$

Параметр η_0 определяет предельное значение коэффициента мощности компенсирующей установки.

Оптимизация проводилась с помощью пакета Optimization Toolbox программного комплекса *MatLab*. Были определены нормированные значения параметров демпфирующих звеньев второго-четвертого порядка. Отношение мощности короткого замыкания сети и реактивной мощности КУ было выбрано равным 50. Относительные значения гармоник тока, создаваемых нелинейной нагрузкой, приведены в табл. 1. В качестве начального приближения использованы параметры фильтров верхних частот Баттерворта соответствующего порядка.

Таблица 1

Относительные значения токов гармоник (в процентах к основной)							
Номера гармоник	3	5	7	13	17	19	23
Значения токов	17,5	11,0	4,5	2,9	1,5	1,0	0,9

Компенсирующие установки с демпфирующими звеньями, рассчитанными с помощью рассмотренной процедуры оптимизации, ослабляют переходные процессы,

возникающие при коммутациях, а также обеспечивают минимальное значение действующего значения гармонических составляющих напряжения в точке подключения.

Значения элементов нормированных звеньев 2 и 4 порядка, полученных с помощью рассмотренной процедуры оптимизации, представлены в таблице 2. Нормированная емкость основного конденсатора равна 1 Ф. Частота настройки компенсирующей установки с демпфирующим звеном равна 3 рад/с.

Таблица 2.

Нормированные параметры демпфирующих звеньев 2 и 4 порядка					
Порядок звена	L_2 , Гн	C_3 , Ф	L_4 , Гн	C_5 , Ф	R, Ом
2	0,084	0,211	-	-	0,364
4	0,0753	0,132	0,132	1	0,279

Нормированные параметры демпфирующих звеньев являются основой для расчета компенсирующих устройств, имеющих заданную реактивную мощность и реализующих требуемые частотные характеристики. Расчет КУ заключается в масштабировании элементов прототипа по заданным основной частоте и величине реактивной мощности.

Результаты и обсуждение

Для оценки влияния демпфирующих звеньев на характеристики компенсирующих установок рассмотрим следующие варианты КУ:

1. Батарея конденсаторов без демпфирующего звена.
2. Компенсирующая установка на основе фильтра C-типа (рис. 1, а).
3. Батарея конденсаторов с демпфирующим звеном второго порядка, имеющим монотонную частотную характеристику.
4. Батарея конденсаторов и демпфирующее звено второго порядка с оптимизированной частотной характеристикой.

Значения элементов демпфирующих звеньев приведены в табл. 3. Емкость основного конденсатора C_1 у всех компенсирующих установок одинакова и равна 3,79 мкФ. Частота настройки широкополосных фильтров, образованных основным конденсатором и демпфирующим звеном, равна 150 Гц. Отношение мощности короткого замыкания внешней сети к реактивной мощности КУ равно 50. Согласно формуле (1) индуктивность сети и компенсирующая установка образуют параллельный контур, резонансная частота которого составляет примерно 350 Гц. Отношение реактивного и активного сопротивлений сети $X_C/R_C = 10$.

Таблица 3.

Параметры демпфирующих звеньев			
Вариант	L_2 , мГн	C_3 , мкФ	R, Ом
2	334,5	30,32	1000
3	164,0	11,3	195
4	235,7	1,0	300

Рассмотрим влияние демпфирующих звеньев на переходные процессы, возникающие при коммутациях в сети.

На рисунке 6 показаны переходные процессы в сети при подключении батарей конденсаторов без демпфирующего звена (кривая 1) и фильтра C-типа (кривая 2). Компенсирующая установка включается в сеть в момент времени 5 мс. Анализ показывает, что включение батареи конденсаторов без демпфирующих звеньев вызывает тяжелый переходный процесс, сопровождающийся значительными перенапряжениями.

Кривые напряжения при включении компенсирующих установок с демпфирующими звеньями лестничной структуры показаны на рисунке 7. Использование демпфирующих звеньев позволяет исключить резонансные перенапряжения, возникающие при коммутациях в сети. Наибольший эффект дает использование демпфирующего звена с монотонной частотной характеристикой, так как оно уменьшает и коммутационные перенапряжения на основном конденсаторе. Для иллюстрации сказанного на рисунке 8 показаны кривые напряжений на конденсаторе C_1 в схемах КУ с простейшим демпфирующим звеном (рис. 1, а) и лестничным звеном второго порядка с монотонной частотной характеристикой. Во втором случае перенапряжение на основном конденсаторе при переходном процессе практически отсутствует.

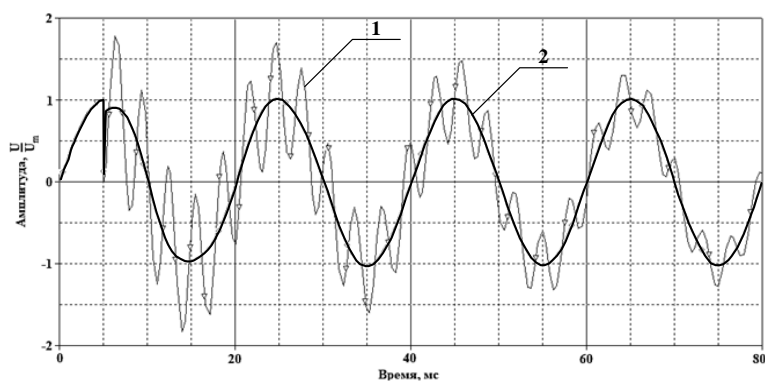


Рис. 6. Переходные процессы при включении в сеть: 1 - батареи конденсаторов, 2 - фильтра С-типа.

Fig. 6. Transient voltage in the grid during switching: 1 – capacitor bank, 2 – C-type filter

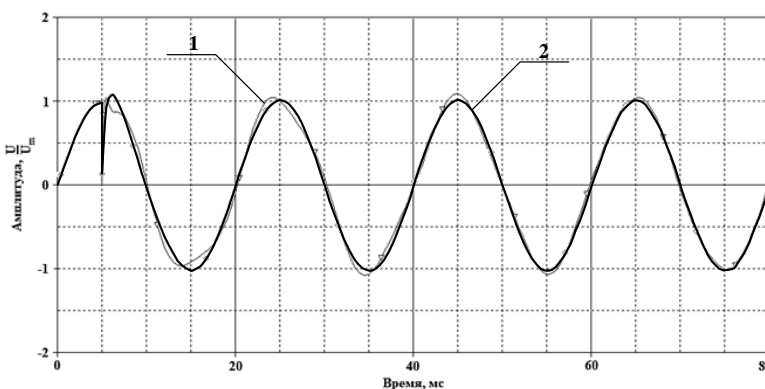


Рис. 7. Переходный процесс при включении компенсирующих установок с демпфирующими звеньями лестничной структуры: 1 - с оптимизированной характеристикой, 2 - с монотонной частотной характеристикой.

Fig. 7. Transient voltage in the grid during switching of shunt capacitor with ladder damping units: 1 – with optimized response, 2 – with monotonic response.

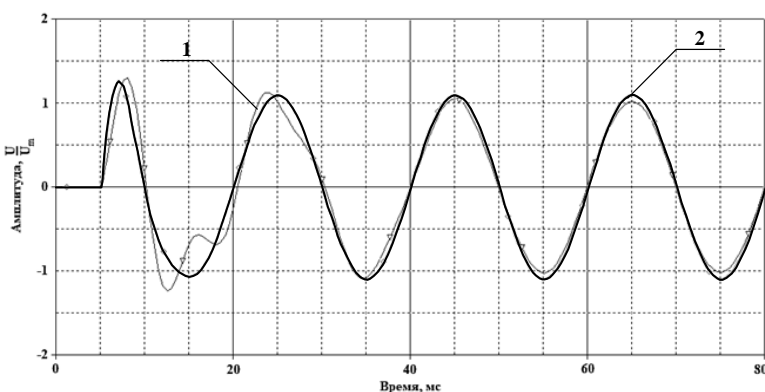


Рис. 8. Напряжение на основном конденсаторе: 1 - в фильтре С-типа, 2 - в лестничном фильтре с монотонной частотной характеристикой.

Fig. 8. Transient voltage across the main capacitor 1 – C-type filter, 2 – ladder filter with monotonic response.

Для оценки фильтрующих свойств компенсирующих установок на рисунке 9 показаны частотные характеристики сети с различными видами КУ. Эффективное ослабление мощных низкочастотных гармоник обеспечивает демпфирующее звено с оптимизированной частотной характеристикой. В таблице 4 представлены значения коэффициентов гармоник напряжения в точке подключения компенсирующей установки. Большой суммарный коэффициент гармоник в сети с батареей конденсаторов (вариант 1) вызван резонансным усилением 7-й гармоники в спектре искаженного напряжения.

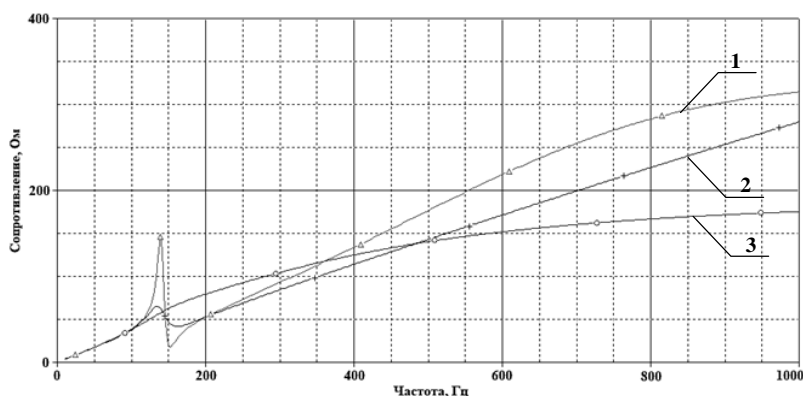


Рис. 9. Частотные характеристики сети в точке общего присоединения при включении: 1 - КУ с оптимизированной характеристикой; 2 - фильтра С-типа; 3 - КУ с монотонной характеристикой

Fig. 9. Power system frequency response: 1 – ladder filter with optimized response 2 – with C-type filter 3 – ladder filter with monotonic response

Таблица 4

Коэффициенты гармоник напряжения							
Вариант схемы	$K_{U(3)}$	$K_{U(5)}$	$K_{U(7)}$	$K_{U(9)}$	$K_{U(11)}$	$K_{U(13)}$	K_U
1	10,6	19,0	180,0	6,33	1,95	0,2	181
2	7,9	7,5	4,41	3,8	2,32	0,2	12,6
3	10,5	10,0	5,1	3,9	2,1	0,25	15,96
4	3,35	8,0	5,0	4,64	2,94	0,17	11,4

Результаты проведенного анализа показывают, что установки поперечной емкостной компенсации с демпфирующими звеньями лестничной структуры эффективно ослабляют тяжелые переходные процессы, возникающие при коммутациях в сети. Максимальный эффект дает применение демпфирующих звеньев с монотонными частотными характеристиками. Звенья с оптимизированными частотными характеристиками обеспечивают компромисс между ослаблением резонансных режимов и фильтрацией мощных низкочастотных гармоник. Их применение целесообразно в тех случаях, когда в системах с большой долей нелинейных нагрузок наблюдаются значительные искажения токов и напряжений.

Заключение

В системах электроснабжения с большой долей нелинейных нагрузок необходимы установки поперечной емкостной компенсации, обеспечивающие демпфирование резонансных режимов и фильтрацию высших гармоник, создаваемых нагрузками. Для этого последовательно с батареей конденсаторов включают демпфирующее звено, имеющее частотно-зависимое активное сопротивление. Как правило, для демпфирования резонансных режимов используют широкополосные фильтры С-типа, состоящие из простейшего демпфирующего звена первого порядка и компенсирующего конденсатора. Однако компенсирующие установки на основе фильтров С-типа имеют недостаточную селективность для одновременного ослабления мощных гармоник и демпфирования резонансных максимумов частотной характеристики сети.

В статье рассмотрены новые конфигурации демпфирующих звеньев для установок поперечной емкостной компенсации в форме LC-четырёхполосников лестничной структуры. Такое представление демпфирующих звеньев позволяет использовать для их расчета методы оптимального синтеза линейных цепей и получить новые варианты компенсирующих установок с требуемыми характеристиками. Показано, что для коррекции частотной характеристики системы электроснабжения и эффективной фильтрации высших гармоник четырёхполосник должен иметь передаточную функцию фильтра верхних частот. Определены условия, при которых звено обеспечивает демпфирование резонансных режимов, возникающих в параллельном контуре, образованном компенсирующей установкой и индуктивностью сети. Предложена процедура расчета параметров демпфирующих звеньев, основанная на оптимизации частотной характеристики КУ в пространстве параметров элементов демпфирующего звена. С ее помощью определены нормированные параметры звеньев 2-4 порядка.

Анализ характеристик установок поперечной емкостной компенсации показал, что КУ с демпфирующими звеньями лестничной структуры имеют существенные преимущества по сравнению с демпфированными конденсаторами на основе фильтров С-типа. Увеличение порядка и изменение конфигураций демпфирующих звеньев позволяют эффективно ослабить резонансные перенапряжения при коммутациях, а также уменьшить гармонические искажения токов и напряжений, возникающие под действием нелинейных нагрузок.

Литература

1. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – 6-е изд., - М., Энергоатомиздат, 2010. – 375 с.
2. Алферов И. В., Зырянов В. М., Митрофанов Н. А. Анализ аварийности и причин выхода из строя конденсаторных установок в системе электроснабжения нефтегазодобывающего месторождения. Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019;23(1):63–74. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-1-63-74.
3. Locci N., Muscas C., Sulis S. Detrimental effects of capacitors in distribution network in the presence of harmonic pollution. IEEE Trans. Power Delivery, 2007, vol. 22, No. 1, pp. 311–315.
4. Bose R., Samanta K., Ghosh K., Bandyopadhyay R., Chatterjee S. Transient analysis of mechanically switched capacitors with and without damping network connected to AC grid. 2016 2nd International Conference on Control, Instrumentation, Energy & communication (CIEC), pp. 274–278.
5. Xu W., Ding T., Li X., Liang H. Resonance-free shunt capacitors – configurations, design methods and comparative analysis, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 31, no. 5, pp. 2287–2295.
6. Wang Y., Xu W., A shared resonance damping scheme for multiple switchable capacitors, IEEE Trans. Power Delivery, 2018, vol. 33, no. 4, pp. 1973–1980.
7. Lamom, A. Ahmed Ibrahim, Balci A., Karadeniz, A., Abdel Aleem, S.H.E. Optimal Design and Analysis of Anti-Resonance C-Type High-Pass Filters. In Proceedings of 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEE IC/IC&CPS Europe), Milan, Italy, 6–9 June 2017.
8. Xu S., Wang Y., Xiao X., Xu W., Wang Y. Adaptive Damping –An Improved Resonance Mitigation Scheme for Shunt Capacitors. IEEE Trans. Power Delivery, 2021, Early Access.
9. Wang Y., Xu S., Xu W., Wu J., Xiao X. Comparative Studies on Design Methods for Detuned C-Type Filter. IEEE trans. on Power Delivery. 2020, Vol. 35, No. 4, pp. 1725–1734.
10. Zhang G., Wang Y., Xu W., Sittler E. Characteristic parameter-based detuned C-type filter design. – IEEE power and energy technology systems journal. Vol. 5, No. 2, 2018, pp. 65–72.
11. Боярская Н.П., Довгун В. П., Егоров Д. Э., Новиков В. В., Шандрыгин Д. А. Минимизация потерь мощности в пассивных силовых фильтрах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. Том 23, № 6, 2021, с. 42–52.
12. Enslin J., Knijp J., Jansen C., Schuld J. Impact of reactive power compensation equipment on the harmonic impedance of high voltage networks. Power Tech Conference Proceedings, IEEE Bologna. Vol. 2, 2003, pp. 274 – 278.
13. Aleem S. H. E. A., Zobaa A. F., Aziz M. M. A., Optimal C-type Passive Filter Based on Minimization of the Voltage Harmonic Distortion for Nonlinear Loads, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, vol. 59, no. 1, pp. 281–289.
14. Aleem S. H. E. A., Zobaa A. F., Balci M. E., Optimal Resonance-free Third-order High-pass Filters Based on Minimization of the Total Cost of the Filters Using Crow Search Algorithm, Electric Power Systems Research, vol. 151, pp. 381–394, Oct. 2017.
15. Lange A., Redlarski G. Selection of C-type filters for reactive power compensation and filtration of higher harmonics injected into the transmission system by arc furnaces. – Energies, 2020, 13, 2330; doi: 10.3390/en13092330.
16. Horton, R., Dugan, R., Hallmark, D. Novel Design Methodology for C-Type Harmonic Filter Banks Applied in HV and EHV Networks. Proceedings of the Conference PES T&D 2012, Orlando, FL, USA, 7–10 May 2012; pp. 1–6.
17. Егоров Д.Э., Довгун В.П., Боярская Н.П., Ян А.В., Слюсарев А.С. Коррекция коэффициента мощности в системах электроснабжения с многофазными нелинейными нагрузками // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 3–15. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-3-15.

18. Довгун В. П., Егоров Д. Э., Новиков В. В. Широкополосные силовые фильтры для систем электроснабжения с многофазными преобразователями. Электротехника, 2020, № 5, с. 47-51.

19. Довгун В. П., Боярская Н. П., Егоров Д. Э., Синяговский А. Ф. Синтез широкополосных фильтров гармоник / В. П. Довгун, Н. П. Боярская, Д. Э. Егоров, А. Ф. Синяговский. // Известия вузов. Проблемы энергетики – 2014. - № 5-6. - С. 85-91.

Авторы публикации

Довгун Валерий Петрович – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Системы автоматизации, автоматизированного управления и проектирования», Сибирский федеральный университет E-mail: vdovgun55@mail.ru, vdovgun@sfu-kras.ru.

Егоров Денис Эдуардович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы автоматизации, автоматизированного управления и проектирования», Сибирский федеральный университет. E-mail: denis.egorov.90@br.ru, deegorov@sfu-kras.ru.

Новиков Виктор Валерьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы автоматизации, автоматизированного управления и проектирования», Сибирский федеральный университет. E-mail: nvv@iksib.ru.

Синяговский Артем Феликсович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы автоматизации, автоматизированного управления и проектирования», Сибирский федеральный университет. E-mail: asinyagovskiy@sfu-kras.ru.

References

1. Zhezhelenko I.V. Vysshie garmoniki v sistemakh promyshlennogo elektrosnabzheniya prompredpriyatii [Higher harmonics in commercial power supply systems of industrial enterprises]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 2010, 375 p. (In Russian).
2. Alferov I., Zyryanov V. M., Mitrofanov N. A. Analysis of accident rate and reasons of condensing unit failures in electrical energy supply system of oil and gas production. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2019; 23(1): pp. 63–74. (In Russian).
3. Locci N., Muscas C., Sulis S. Detrimental effects of capacitors in distribution network in the presence of harmonic pollution. IEEE Trans. Power Delivery, 2007, vol. 22, No. 1, pp. 311–315.
4. Bose R., Samanta K., Ghosh K., Bandyopadhyay R., Chatterjee S. Transient analysis of mechanically switched capacitors with and without damping network connected to AC grid. 2016 2nd International Conference on Control, Instrumentation, Energy & communication (CIEC), pp. 274-278.
5. Xu W., Ding T., Li X., Liang H. Resonance-free shunt capacitors – configurations, design methods and comparative analysis, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 31, no. 5, pp. 2287–2295.
6. Wang Y., Xu W., A shared resonance damping scheme for multiple switchable capacitors, IEEE Trans. Power Delivery, 2018, vol. 33, no. 4, pp. 1973–1980.
7. Lamlom, A. Ahmed Ibrahim, Balc A., Karadeniz, A., Abdel Aleem, S.H.E. Optimal Design and Analysis of Anti-Resonance C-Type High-Pass Filters. In Proceedings of 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (IEEE IC/ICPS Europe), Milan, Italy, 6–9 June 2017.
8. Xu S., Wang Y., Xiao X., Xu W., Wang Y. Adaptive Damping – An Improved Resonance Mitigation Scheme for Shunt Capacitors. IEEE Trans. Power Delivery, 2021, Early Access.
9. Wang Y., Xu S., Xu W., Wu J., Xiao X. Comparative Studies on Design Methods for Detuned C-Type Filter. IEEE trans. on Power Delivery. 2020, Vol. 35, No. 4, pp. 1725-1734.
10. Zhang G., Wang Y., Xu W., Sittler E. Characteristic parameter-based detuned C-type filter design. – IEEE power and energy technology systems journal. Vol. 5, No. 2, 2018, pp. 65-72.
11. Boyarskaya NP, Dovgun VP, Egorov DE, Novikov VV, Shandrigin DA. Minimization of power losses in passive power filters. Power engineering: research, equipment, technology. 2021;23(6):42-52. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-42-52.

12. Enslin J., Knijp J., Jansen C., Schuld J. Impact of reactive power compensation equipment on the harmonic impedance of high voltage networks. Power Tech Conference Proceedings, IEEE Bologna. Vol. 2, 2003, pp. 274 – 278.

13. Aleem S. H. E. A., Zobaa A. F., Aziz M. M. A., Optimal C-type Passive Filter Based on Minimization of the Voltage Harmonic Distortion for Nonlinear Loads, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, vol. 59, no. 1, pp. 281–289.

14. Aleem S. H. E. A., Zobaa A. F., Balci M. E., Optimal Resonance-free Third-order High-pass Filters Based on Minimization of the Total Cost of the Filters Using Crow Search Algorithm, Electric Power Systems Research, vol. 151, pp. 381-394, Oct. 2017.

15. Lange A., Redlarski G. Selection of C-type filters for reactive power compensation and filtration of higher harmonics injected into the transmission system by arc furnaces. – Energies, 2020, 13, 2330; doi: 10.3390/en13092330.

16. Horton, R., Dugan, R., Hallmark, D. Novel Design Methodology for C-Type Harmonic Filter Banks Applied in HV and EHV Networks. Proceedings of the Conference PES T&D 2012, Orlando, FL, USA, 7–10 May 2012; pp. 1–6.

17. Egorov DE., Dovgun VP., Boyarskaya NP., Jan AW., Slyusarev AS. Power factor correction in power delivery systems with multipulse nonlinear loads. Power engineering: research, equipment, technology. 2020;22(6): 3-15. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-3-15. (in Russian)/

18. Dovgun V. P., Egorov D. E., Prozorov N. R., Novikov V. V. Broadband Power Filters for Power Supply Systems with Multiphase Converters. Russian Electrical Engineering, Vol. 91, No. 5, 2020, pp. 330-335.

19. Dovgun V. P., Egorov D. E., Novikov V. V., Sinyagovsky F. F. Synthesis of wideband power harmonic filters. Power engineering: research, equipment, technology. – 2014. - № 5-6. - pp. 85-91. (in Russian)

Authors of the publication

Valery P. Dovgun – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Denis E. Egorov – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Viktor V. Novikov – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Artiom F. Sinjagovsky – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Получено

30.06.2022 г.

Отредактировано

04.08.2022 г.

Принято

08.08.2022 г.