

УДК 621.300

Коррекция коэффициента мощности в электрических сетях нефтедобывающих предприятий

**В.П. Довгун*, Д.Э. Егоров,
В.В. Новиков, Е.А. Толстихина**

*Сибирский федеральный университет,
Россия 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79*

Received 24.02.2012, received in revised form 03.07.2013, accepted 09.09.2013

В статье рассмотрены вопросы коррекции коэффициента мощности в сетях нефтедобывающих предприятий с помощью пассивных фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ). Для проектирования ФКУ использован метод, основанный на представлении фильтра в виде реактивного четырехполюсника, нагруженного на сопротивление питающей сети. Спроектированное устройство выполняет одновременно функции компенсатора реактивной мощности основной гармоники и фильтра высших гармоник. Приведен пример расчета, иллюстрирующий предложенный метод.

Ключевые слова: коррекция коэффициента мощности, нелинейная нагрузка, пассивные фильтры гармоник.

Введение

Структурные изменения в промышленности Севера Сибири, связанные с добычей и транспортировкой углеводородов, привели к качественному изменению нагрузок электрических сетей этого региона. Внедрение энергосберегающих технологий приводит к значительному увеличению доли нелинейных нагрузок в сетях нефтяных и газовых месторождений.

Современные буровые установки оборудованы системами регулируемого электропривода, источниками питания которых служат многофазные выпрямители, имеющие большую индуктивность со стороны постоянного напряжения. На стороне питающей сети такой выпрямитель эквивалентен источнику тока с большим внутренним сопротивлением. Фазные токи выпрямителей имеют форму прямоугольных импульсов, повторяющихся с частотой питающей сети.

Особенность многофазных выпрямителей заключается в том, что они являются источниками высших гармоник тока. Относительные значения токов гармоник (по отношению к 1-й) для многофазных выпрямителей приведены в табл. 1 [3]. В таблице 1 n – «пульсность» выпрямителя.

Данные, приведенные в табл. 1, являются усредненными. Согласно результатам измерений, приведенных в [6], значения отдельных гармоник в спектре тока выпрямителя могут быть

Таблица 1. Относительные значения токов гармоник многофазных выпрямителей

n	5	7	11	13	17	19	23	25
6	0.175	0.11	0.045	0.029	0.015	0.01	0.009	0.008
12	0.021	0.014	0.075	0.059	0.011	0.009	0.015	0.011

значительно выше. Так, относительное значение пятой гармоники может достигать 40 %. Кроме того, несимметрия углов включения тиристоров в многофазных преобразователях приводит к появлению гармоник тока четных порядков.

Мощные нелинейные электроприемники имеют низкий коэффициент мощности, что обусловлено работой асинхронных электродвигателей с мощностью ниже номинальной, а также несинусоидальной формой напряжений и токов. Низкое значение коэффициента мощности вызывает большие потери напряжения и мощности в питающей линии. Несинусоидальные режимы систем электроснабжения приводят к нагреву и дополнительным потерям в трансформаторах и вращающихся электрических машинах, ускоренному старению изоляции, сбоям в работе устройств релейной защиты, электросетевой и технологической автоматики, возникновению аварийных ситуаций.

Традиционным средством компенсации реактивной мощности в электрических сетях являются конденсаторные установки (КУ). Реактивная мощность, отдаваемая конденсатором на частоте основной гармоники, определяется выражением

$$Q_C = U^2 / X_C,$$

где X_C – емкостное сопротивление КУ на частоте первой гармоники.

Искажение формы напряжений и токов отрицательно влияет на работоспособность КУ. Потери энергии в конденсаторах пропорциональны частоте. Поэтому присутствие в сетевом напряжении гармоник высоких порядков может привести к значительному повышению потерь, ускоренному старению изоляции и выходу конденсаторов из строя. Для повышения коэффициента мощности при несинусоидальных режимах целесообразно использовать специальные фильтрокомпенсирующие устройства – пассивные и активные фильтры гармоник.

Пассивный фильтр гармоник (ПФГ) представляет пассивную частотно-селективную цепь, обеспечивающую подавление или ослабление высших гармоник, генерируемых нелинейной нагрузкой. Основными достоинствами пассивных фильтров являются их простота и экономичность. Они дешевы, не требуют регулярного обслуживания, могут выполнять одновременно несколько функций: подавление гармоник, коррекцию коэффициента мощности, уменьшение провалов напряжения при пуске мощных электродвигателей [5]. ПФГ изготавливаются по традиционным, хорошо отработанным технологиям.

Активный фильтр гармоник представляет коммутируемое устройство, выполняющее одновременно несколько функций: подавление высших гармоник, коррекцию коэффициента мощности, снижение фликкера. В качестве коммутируемых элементов в активных фильтрах используются мощные МОП-транзисторы или биполярные транзисторы с изолированным за-

твором (IGBT). Важное достоинство активных фильтров заключается в том, что они являются адаптивными устройствами, характеристики которых изменяются в зависимости от режима работы сети и характеристик нагрузки. Недостатки АФГ заключаются в сложности, высокой стоимости, необходимости квалифицированного обслуживания. Поэтому благодаря своей простоте, экономичности и надежности пассивные фильтры гармоник остаются наиболее распространенным видом фильтрокомпенсирующих устройств.

В статье рассмотрены вопросы коррекции коэффициента мощности в электрических сетях нефтедобывающих предприятий с помощью фильтрокомпенсирующих устройств, состоящих из пассивных фильтров гармоник и шунтирующих реакторов с тиристорным управлением. Для проектирования ПФГ использован метод, основанный на представлении фильтра в виде реактивного четырехполюсника, нагруженного на сопротивление питающей сети [7]. Такой подход позволяет использовать при проектировании фильтра хорошо разработанные регулярные методы синтеза пассивных цепей. Устройство, спроектированное с помощью предлагаемого метода, выполняет одновременно функции компенсатора реактивной мощности основной гармоники и фильтра высших гармоник.

Процедура синтеза пассивных фильтрокомпенсирующих устройств

Основной конфигурацией ПФГ является последовательный колебательный контур, настроенный на частоту определенной гармоники (рис. 1). Для одновременного подавления нескольких гармоник можно использовать широкополосные фильтры, показанные на рис. 2, 3. Недостаток широкополосных фильтров – большие потери, обусловленные наличием дополнительного резистора в схеме. Поэтому для подавления нескольких гармоник используют структуры, образованные параллельным соединением колебательных контуров, каждый из которых настроен на частоту одной из гармоник. Установка таких фильтров вблизи нелинейной нагрузки обеспечивает замыкание на землю токов высших гармоник через соответствующий колебательный контур.

Реактивная мощность последовательного колебательного контура на частоте основной гармоники отличается от мощности одиночного конденсатора Q_C в $n^2 / (n^2 - 1)$ раз. Здесь $n = \omega_{0n} / \omega_1$ – кратность резонансной частоты последовательного колебательного контура к частоте основной гармоники. Увеличение отдаваемой реактивной мощности вызвано увеличением напряжения конденсатора

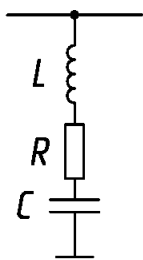


Рис. 1

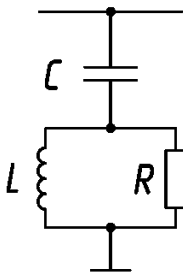


Рис. 2

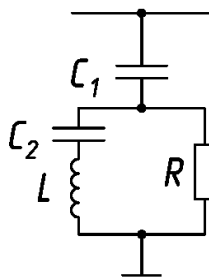


Рис. 3

$$U_c = U_0 + U_L = \frac{n^2}{n^2 - 1} U_0,$$

где U_0 – напряжение питающей сети.

Существующие методы проектирования пассивных фильтров гармоник [1, 4, 5] заключаются в расчете параметров колебательных контуров, обеспечивающих подавление гармоник тока определенной частоты. Такие методы позволяют контролировать частотные характеристики только на частотах резонансов параллельных ветвей. Однако составной фильтр представляет сложную резонансную систему, в которой необходимо учитывать взаимное влияние ветвей фильтра и сопротивления питающей сети. Отдельные ветви фильтра образуют параллельные колебательные контуры с индуктивностью сети. Если частота параллельного резонанса совпадает с частотой одной из гармоник, амплитуда этой гармоники в сети может возрасти в несколько раз. Добавление каждого нового звена приводит возникновению еще одного параллельного колебательного контура. Таким образом, при проектировании пассивных фильтрокомпенсирующих устройств важно контролировать частоты параллельных резонансов системы «фильтр – питающая сеть».

Представим систему «фильтр – питающая сеть» эквивалентной схемой, показанной на рис. 4. Здесь $Z_c = R_c + j\omega L_c$ – комплексное сопротивление сети со стороны шин, к которым присоединена нелинейная нагрузка, Z_ϕ – комплексное сопротивление фильтра. Источник гармоник моделируется источником тока J_r .

Комплексные сопротивления фильтра и сети на рис. 4 образуют делитель тока. Коэффициент передачи тока k -й гармоники во внешнюю сеть

$$H_c(j\omega) = \frac{I_c}{J_r} = \frac{Z_\phi}{Z_\phi + Z_c}. \quad (1)$$

Из формулы (1) следует, что для эффективного подавления тока k -й гармоники значение коэффициента $H_c(j\omega)$ на частоте этой гармоники должно быть близко к нулю.

Представим составной фильтр гармоник реактивным двухполюсником, операторное сопротивление которого является дробно-рациональной функцией комплексной переменной s :

$$Z(s) = G \frac{\prod_{i=1}^n (s^2 + \omega_i^2)}{\prod_{j=1}^{n-1} (s^2 + \omega_j^2)} = GZ'(s). \quad (2)$$

Здесь ω_i и ω_j – частоты нулей и полюсов $Z(s)$, G – постоянный множитель.

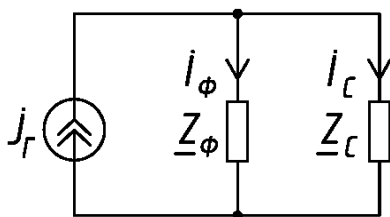


Рис. 4

Нули и полюсы входного сопротивления реактивной цепи расположены на мнимой оси плоскости комплексных чисел и чередуются. Множитель G позволяет определить сопротивление фильтра на частоте основной гармоники и величину отдаваемой реактивной мощности.

Функция передачи токов системы «фильтр – питающая» сеть является дробно-рациональной функцией комплексной переменной s :

$$H_c(s) = \frac{Z(s)}{sL_c + Z(s)} = \frac{N(s)/D(s)}{sL_c + N(s)/D(s)}. \quad (3)$$

Из формулы (3) следует, что коэффициент передачи токов $H_c(s)$ имеет нули на частотах нулей входного сопротивления фильтра $Z(s)$. На частотах полюсов $Z(s)$ модуль коэффициента передачи $H_c(s)$ принимает значения, равные 1. Частоты нулей и единичных значений $H_c(s)$ не зависят от сопротивления питающей сети. Передаточная функция $H_c(s)$ имеет максимумы на интервалах между соседними нулями и полюсами. Проектировщик может варьировать частоты максимумов $H_c(s)$ за счет изменения координат полюсов входного сопротивления фильтра.

Рассмотрим подробнее процедуру синтеза реактивного двухполюсника, реализующего фильтр гармоник. Операторная проводимость реактивного двухполюсника

$$Y(s) = \frac{1}{Z(s)} = \frac{1}{G} \frac{\prod_{j=1}^{n-1} (s^2 + \omega_j^2)}{\prod_{i=1}^n (s^2 + \omega_i^2)}.$$

Представим $Y(s)$ в виде суммы слагаемых

$$Y(s) = \frac{1}{G} \sum_{i=1}^n \frac{k_i s}{s^2 + \omega_i^2}. \quad (4)$$

Формуле (4) соответствует структура, образованная параллельным соединением последовательных колебательных контуров, имеющих резонансные частоты ω_i^2 . Вычет k_i определяется по формуле [7]

$$k_i = (s^2 + \omega_i^2) \frac{Y(s)}{s} \Big|_{s^2 = -\omega_i^2} \quad (5)$$

Значения элементов i -го колебательного контура находятся по формулам

$$L_i = \frac{1}{k_i}; \quad C_i = \frac{k_i}{\omega_i^2}. \quad (6)$$

В зависимости от режима работы буровой установки величина потребляемой мощности значительно изменяется. Это вызывает колебания напряжения. Частые повышения напряжения приводят к повреждению батарей конденсаторов. При резкопеременными нагрузками, характерных для буровых установок, для стабилизации напряжения может потребоваться динамическая компенсация реактивной мощности. Пассивный фильтр гармоник является статическим устройством, поэтому для регулирования величины генерируемой реактивной мощности в состав ФКУ целесообразно включить шунтирующий реактор. Поскольку сопротивление фильтра

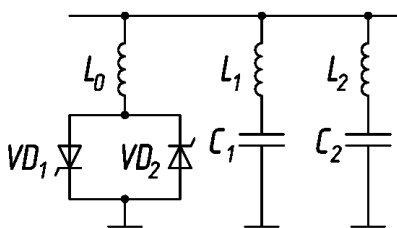


Рис. 5

на частоте основной гармоники имеет емкостный характер, избыточная реактивная мощность фильтра компенсируется мощностью реактора. Управление реактором осуществляется с помощью встречно включенных тиристорных вентилей (рис. 5).

Реактивная мощность реактора с тиристорным управлением зависит от угла включения α :

$$Q_{PTV} = \frac{U^2}{\omega_1 L} \left(\frac{\alpha - \sin \alpha}{\pi} \right).$$

Здесь ω_1 – частота первой гармоники. Использование реактора с тиристорным управлением обеспечивает плавное регулирование реактивной мощности. Методика расчета таких устройств подробно представлена в [8].

Рассмотрим теперь процедуру расчета фильтрокомпенсирующего устройства. Исходными данными для расчета ФКУ являются мощность нелинейной нагрузки, коэффициент реактивной мощности, а также спектральный состав токов, генерируемых нелинейной нагрузкой.

Расчет фильтрокомпенсирующего устройства выполняется в следующем порядке.

1. На первом шаге определяется реактивная мощность ФКУ

$$Q_{ФКУ} = P_H (tg \varphi_H - tg \varphi_{ЭС}),$$

где P_H – активная мощность нагрузки, $tg \varphi_H$ – коэффициент реактивной мощности нагрузки, $tg \varphi_{ЭС}$ – коэффициент реактивной мощности нагрузки, задаваемый энергосистемой. Согласно приказу Минпромэнерго № 49 от 22.02.2007 для напряжения 6 кВ $tg \varphi_{ЭС} = 0.4$.

2. На втором шаге формируется модель системы питающая сеть – нагрузка. Для этого осуществляется анализ информации о параметрах питающей сети. Необходимо исследовать частотные характеристики сети при различных режимах работы для того, чтобы при проектировании фильтра исключить возможность возникновения параллельных резонансов и перегрузки ветвей фильтра. Нелинейная нагрузка моделируется источниками тока, учитывающими отдельные гармонические составляющие.

3. На основе данных, полученных на предыдущих этапах, формируется передаточная функция системы «фильтр – питающая сеть» $H_c(s)$. Для упрощения расчетов целесообразно использовать передаточную функцию, нормированную к частоте первой гармоники. На основе $H_c(s)$ определяются параметры входного сопротивления ФКУ $Z_{вх}(s)$, обеспечивающего требуемую амплитудно-частотную характеристику. Коэффициент G в выражении (2) определяется по формуле

$$G = \frac{U_{\phi}^2}{Q_{\phi KY} Z'_{вх}(j1)}. \quad (7)$$

Имеется определенная свобода в выборе координат полюсов функции входного сопротивления $Z(s)$. Это дает возможность контролировать АЧХ системы «фильтр – питающая сеть». Функция входного сопротивления $Z_{вх}(s)$ определяет структуру проектируемого фильтра. Поэтому для получения фильтра простейшей структуры целесообразно рассмотреть несколько функций входного сопротивления возрастающего порядка. Выбирается сопротивление минимального порядка, обеспечивающее требуемые параметры качества электрической энергии.

4. Осуществляется синтез реактивного двухполюсника, реализующего сопротивление $Z_{вх}(s)$, определенное на предыдущем этапе. Нормированные значения элементов фильтра C_{i*} , L_{i*} рассчитываются с помощью формул (5, 6). Затем производится денормирование значений элементов по отношению к частоте основной гармоники: $C_i = C_{i*} / 314$, $L_i = L_{i*} / 314$.

5. Определяется реактивная мощность, генерируемая секциями фильтра на частоте первой гармоники, по формуле

$$Q_i = U^2 C_{i*} \frac{n^2}{1 - n^2}.$$

6. Рассчитывается коэффициент мощности после установки спроектированного фильтра.

Пример расчета фильтрокомпенсирующего устройства

Для иллюстрации предлагаемого метода рассмотрим пример расчета пассивного ФКУ.

Необходимо рассчитать пассивное фильтрокомпенсирующее устройство, обеспечивающее подавление 5-, 7- и 11-й гармоник для установки в сети 6 кВ. Нелинейной нагрузкой является буровая установка БУ 2500, полная мощность которой составляет 1 МВА. Питание буровой установки осуществляется с помощью линии электропередачи 6 кВ протяженностью 7 км. Расстояние между проводами 4,0 м, марка провода СИП-3. В качестве исходных данных для расчета используем результаты измерений, приведенные в работе [9]. Получасовой максимум потребления активной и реактивной мощности составляет 555 кВт и 850 квар соответственно. Коэффициент реактивной мощности нагрузки

$$\operatorname{tg} \varphi_H = \frac{Q_H}{P_H} = \frac{850}{555} = 1.53.$$

Провод марки СИП-3 имеет активное удельное сопротивление 0.363 Ом/км, индуктивное удельное сопротивление 0.319 Ом/км. Эквивалентное сопротивление питающей сети на частоте основной гармоники $Z_c = (2.5 + j2.23)$ Ом.

Реактивная мощность ФКУ

$$Q_{\phi KY} = P_H (\operatorname{tg} \varphi_H - \operatorname{tg} \varphi_{\Sigma C}) = 3 \cdot (1.53 - 0.4) = 628 \text{ квар}.$$

Расчет ФКУ выполняем для одной фазы. Функция входного сопротивления фильтра, нормированная к частоте первой гармоники

$$Z'(s) = \frac{(s^2 + (4,95)^2)(s^2 + (6,95)^2)(s^2 + (10,95)^2)}{s(s^2 + 36)(s^2 + (9,75)^2)}.$$

Нормированные значения частот нулей $Z'(s)$ равны: $n_5 = 4.95$, $n_7 = 6.95$, $n_{11} = 10.95$. Частоты полюсов $Z'(s)$ выбраны равными 6 и 9.75. Синтезируемый фильтр представляет параллельное соединение трех звеньев.

Коэффициент G , обеспечивающий требуемую реактивную мощность первой гармоники, равен

$$G = \frac{U_{\phi}^2}{Q_{Z'_{\text{вх}}}(j1)} = \frac{(3,464 \cdot 10^3)^2}{(209.3) \cdot 10^3 \cdot 40.152} \approx 1.428.$$

Функция входной проводимости фильтра

$$Y(s) = \frac{1}{1.428} \frac{s(s^2 + 36)(s^2 + 95,06)}{(s^2 + 24,503)(s^2 + 48,303)(s^2 + 119,902)}.$$

Параметры звеньев фильтра, рассчитанные с помощью рассмотренной методики, приведены в табл. 2. Значения реактивной мощности, генерируемой ФКУ, – в табл. 3.

Значения экстремумов АЧХ фильтра, рассчитанные с помощью программы Pspice, приведены в табл. 4.

Сведем значения гармоник тока в табл. 5.

Параметры, определяющие режим в линии до и после установки ФКУ, приведены в табл. 6.

Рассмотренный пример показывает, что установка ФКУ позволяет увеличить коэффициент мощности до 0.928. При этом значительно снизились потери мощности (на 65,3 %) и напряжения (на 45,1 %), увеличилась пропускная способность линии электропередачи.

Таблица 2. Параметры звеньев фильтра

№ гармоники	k_i	L_i , мГн	C^i , мкФ
5	0.227	14	30
7	0.214	15	14
11	0.194	16	5

Таблица 3. Реактивная мощность, генерируемая звеньями ФКУ

Q_1 , кВАр	Q_2 , кВАр	Q_3 , кВАр	Q_{Σ} , кВАр
127.8	59.98	21.57	209.3

Таблица 4. Значения экстремумов АЧХ

Частота, Гц	Значение АЧХ, отн. ед.
186	3.09
250	0.079
312	2.5
350	0.044
519	3.6
550	0.038

Таблица 5. Гармонический состав токов в линии

	I_1 , А	I_5 , А	I_7 , А	I_{11} , А	K_1	λ
Без ФКУ	87.98	15.4	9.7	4	0.212	0.535
с ФКУ	91.1	1.22	0.426	0.15	0.014	0.928

Таблица 6. Параметры режима линии

	Действующее значение тока, А	Потери активной мощности, кВт	Потеря напряжения, В	K_1	Коэффициент мощности
Без ФКУ	91.6	66	551	0.212	0.535
с ФКУ	54.8	23	302	0.014	0.928

Заключение

Для повышения коэффициента мощности и снижения уровня высших гармоник напряжения и тока в сетях нефтяных и газовых месторождений целесообразно использовать пассивные фильтрокомпенсирующие устройства. Установка фильтрокомпенсирующих устройств позволяет увеличить пропускную способность ЛЭП, снизить потери мощности и напряжения в линии, повысить качество электроэнергии у потребителей. ФКУ, спроектированные с помощью предложенного метода, обеспечивают компенсацию реактивной мощности на частоте основной гармоники, а также снижение уровня высших гармоник. Предлагаемый метод проектирования фильтров позволяет исключить возможность резонансного усиления отдельных гармоник.

Список литературы

- [1] Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 4-е изд., М.: Энергоатомиздат, 1994.
- [2] Куско А., Томпсон М. Качество энергии в электрических сетях. М.: Додэка-XXI, 1985. 336 с.
- [3] Карташев И.И., Тульский В.Н., Шамонов Р. Г. и др. Управление качеством электроэнергии / ред. Ю.В. Шаров. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 320 с.

- [4] Das J. // IEEE trans. on industry applications, 2004. Vol. 40. No. 1. P. 232-241.
- [5] Phipps J. // IEEE industry application magazine, March/April 1997. P. 68-82.
- [6] Merhej S., Nichols W. // IEEE trans. on industry applications. 1994. Vol. 30. No. 3. P. 533-542.
- [7] Довгун В.П., Боярская Н.П., Новиков В.В. // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2011. № 910. С. 31-39.
- [8] Вагин Г.Я., Лоскутов А.Б., Севостьянов А.А. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. Н. Новгород: НГТУ, 2004. 214 с.
- [9] Исцелемов Д.А., Хузин Р.А. // Научные исследования и инновации. Пермский национальный исследовательский политехнический университет. 2010. № 1. С. 129-132.

Power Factor Correction in Electrical Grids of Oil-Extracting Plants

**Valery P. Dovgun, Denis E. Egorov,
Victor V. Novikov and Ekaterina A. Tolstichina**
*Siberian Federal University
79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041, Russia*

Problems of the power factor correction in electrical grids of oil-processing plants are considered. A novel approach of passive harmonic filter design is presented. The proposed approach is based on the consideration of the filter as a reactive two-port loaded by the grid impedance. The design procedure is discussed in detail and illustrative example is presented.

Keywords: power quality, nonlinear load, passive harmonic filters.
