

ОБЗОР МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМИ ФИЛЬТРАМИ

Бурлака В.В., асс., Поднебенная С.К., ст. препод., Дьяченко М.Д., к.т.н., доц.
 Призовский государственный технический университет
 ул. Университетская, 7, 87500, г. Мариуполь, Украина
 E-mail: podsvet@gmail.com

Рассмотрены методы управления активными фильтрами – временные: метод, основанный на теории мгновенной мощности (p-q метод), метод следящей синхронизации (SDM), метод, основанный на математических преобразованиях Кларка и Парка (d-q метод), и частотные: с применением быстрого преобразования Фурье и рекурсивного дискретного преобразования Фурье.

Ключевые слова: активный фильтр, теория мгновенной мощности, преобразования Кларка и Парка.

Введение. Широкое распространение нагрузок, потребляющих несинусоидальный ток, приводит к тому, что качество электроэнергии значительно ухудшается. Это приводит к искажению формы кривой напряжения сети, что в свою очередь ведет к увеличению потерь в электрических машинах и аппаратах, увеличению интенсивности старения изоляции, появлению перенапряжений из-за резонансных явлений в сети, ухудшению работы устройств релейной защиты, автоматики и телемеханики вследствие появления высокочастотных помех и др.

Анализ предыдущих исследований. ГОСТ 13109-97 нормирует качество электроэнергии по нескольким показателям. Одним из них является коэффициент несинусоидальности кривой напряжения, который для сетей 0,4 кВ, согласно ГОСТ [1], может достигать величины 8% (предельно допустимое значение – 12%) (при расчете до 40-й гармоники). Коэффициент несинусоидальности кривой тока ГОСТом не нормируется, но следует помнить, что потребляемый несинусоидальный ток является первопричиной искажения кривой напряжения.

На сегодняшний день существует несколько вариантов решения задачи повышения качества электроэнергии. Одним из них является использование параллельных активных фильтров [2], а

Цель работы. качество работы фильтра зависит от применяемого метода формирования задающих воздействий на силовую часть фильтра. Обзор методов управления активными фильтрами по критериям возможности компенсации реактивной мощности, устранения несимметрии напряжений, компенсации высших гармоник тока.

Материал и результаты исследований. Методы управления активными фильтрами условно можно разделить на две группы: временные и частотные (рис. 1).

К временным методам относят: d-q метод по основной частоте и/или высшим гармоникам; метод следящей синхронизации (SDM); теорию мгновенной мощности p-q (и вариации). В основе частотных методов (БПФ и РДПФ) лежит дискретное преобразование Фурье.

Временные методы не требуют больших объемов памяти для хранения выборок последнего периода и наличия мощного процессора для

вычислений, благодаря чему позволяют упростить систему управления.

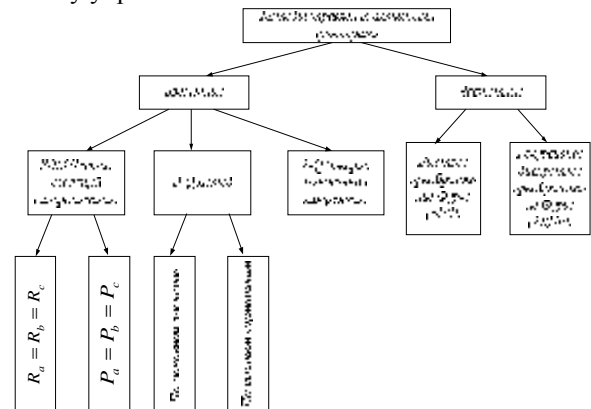


Рисунок 1 – Классификация методов управления активными фильтрами

В основе многих методов управления АФ лежит преобразование трехфазной системы векторов (координаты *a-b-c*) в линейно-независимую двухфазную (система координат *a-b-0*) – преобразование Кларка:

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где f_a, f_b, f_0 – функция в координатах *a-b-0*; f_a, f_b, f_c – функция в координатах *a-b-c*.

В трехфазных трехпроводных сетях используют систему координат *a, b*, которая неподвижна в пространстве, т.к. компонента нулевой последовательности тока нагрузки отсутствует. Векторы тока нагрузки и ЭДС сети вращаются в этой системе координат с частотой сети (ω) и в любой момент времени могут быть представлены через свои проекции на оси *a, b* (рис. 2).

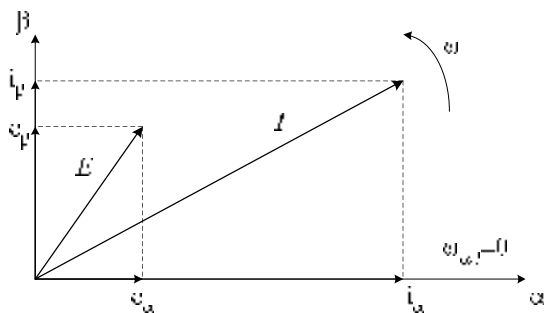


Рисунок 2 – Система координат a, b

Вектор ЭДС:

$$\underline{E} = e_a + j e_b, \quad (2)$$

где e_a, e_b - проекции вектора ЭДС на оси a, b .

Вектор тока:

$$\underline{I}_{ab} = i_a + j i_b, \quad (3)$$

где i_a, i_b - проекции вектора тока на оси a, b .

Полную мощность найдем в результате произведения комплекса ЭДС на сопряженный комплекс тока:

$$\mathcal{S}^* = \underline{E} \cdot \underline{I}^*, \quad (4)$$

Подставив (2), (3) в (4) имеем:

$$\begin{aligned} \mathcal{S}^* = \underline{E} \cdot \underline{I}^* &= (e_a + j \cdot e_b) \cdot (i_a - j \cdot i_b) = \\ &= (e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b) + j \cdot (e_b \cdot i_a - e_a \cdot i_b) = p + j \cdot q \end{aligned} \quad (5)$$

Отсюда мгновенные активная и реактивная мощности:

$$\begin{aligned} p &= e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b \\ q &= e_b \cdot i_a - e_a \cdot i_b \end{aligned} \quad (6)$$

Применение теории мгновенной мощности.

Мгновенная активная мощность p состоит из постоянной (\bar{p}) и переменной (\mathcal{P}) составляющей. Постоянная составляющая активной мощности представляет собой часть энергии, которую требуется передать от источника нагрузке за единицу времени. Переменная составляющая характеризует величину энергии, которой обменивается источник с нагрузкой за единицу времени. Мгновенная реактивная мощность q является количественной характеристикой процессов обмена энергией между фазами [4].

Ток компенсации, формируемый активным фильтром, определяется переменной составляющей мгновенной активной мощности и мгновенной реактивной мощностью:

$$\begin{bmatrix} i_{Fa}^* \\ i_{Fb}^* \\ i_{Fc}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_a & e_b \\ e_b & -e_a \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} p - \bar{p} \\ q \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $i_{Fa}^*, i_{Fb}^*, i_{Fc}^*$ - токи, формируемые активным фильтром; e_a, e_b - проекции вектора ЭДС на оси a, b ; \bar{p} - постоянная составляющая мгновенной активной мощности; p - мгновенная активная мощность; q - мгновенная реактивная мощность.

Практически выделение постоянной составляющей активной мощности \bar{p} производится фильтром нижних частот с частотой среза ниже частоты сети, что позволяет АФ эффективно подавлять интергармоники тока нагрузки.

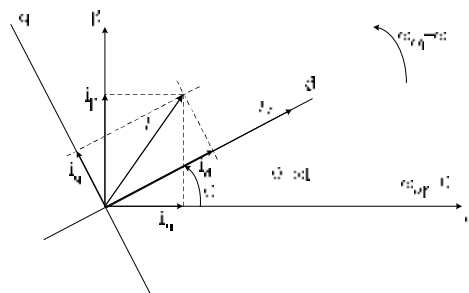


Рисунок 3 – Система координат $d-q$

D-q метод по основной частоте характеризуется тем, что трехфазная система векторов напряжений и токов нагрузки преобразуется с помощью преобразований Кларка и Парка в систему координат d (прямую) и q (квадратурную), вращающуюся с частотой промышленной сети.

Преобразование проходит в два этапа. На первом этапе происходит преобразование из системы координат $a-b-c$ в систему координат $a-b$ (1). На втором этапе (преобразование Парка) - из системы координат $a-b$ в систему $d-q$ (рис. 3):

$$\underline{I}_{dq} = \underline{I}_{ab} \cdot e^{-j\omega t} = i_a \cos \omega t + i_b \sin \omega t + j \cdot (i_b \cos \omega t - i_a \sin \omega t) = i_d + j i_q, \quad (9)$$

где ωt - угол между осями d и a . тогда

$$\begin{aligned} i_d &= i_a \cos \omega t + i_b \sin \omega t \\ i_q &= i_b \cos \omega t - i_a \sin \omega t \end{aligned} \quad (10)$$

Для вектора напряжения преобразования аналогичны. Вектор напряжения в системе $d-q$ представляется в виде

$$\underline{U}_{dq} = u_d + j u_q. \quad (11)$$

Если совместить ось d с вектором напряжения сети (это достигается применением для формирования угла ωt петли ФАПЧ, синхронизированной с напряжением сети), то $u_d = \underline{U}, u_q = 0$, а $\underline{U}_{dq} = u_d = \underline{U}$, и комплекс полной мощности нагрузки может быть определен как:

$$\begin{aligned} \mathcal{S}^* &= \underline{U}_{dq} \cdot \underline{I}_{dq}^* = u_d \cdot (i_d - j \cdot i_q) = u_d \cdot i_d - j \cdot u_d \cdot i_q = \\ &= p + j \cdot q \end{aligned} \quad (12)$$

таким образом $p = u_d \cdot i_d$, $q = -u_d \cdot i_q$.

Целью управления АФ является: 1) устранение переменных составляющих компонент i_d и i_q тока сети (подавление гармоник); 2) устранение постоянной составляющей компоненты i_q (компенсация реактивной мощности); 3) установка постоянной составляющей i_d так, чтобы выполнялся баланс активной мощности (рис. 4):

$$P_{\text{ндо}} = P_o + P_i, \quad (13)$$

где $P_{уст}$ – мощность, отбираемая из сети; P_{ϕ} – мощность потерь в АФ; P_n – мощность нагрузки.

Таким образом, работа АФ должна приводить к тому, что вектор тока сети в системе $d-q$ должен быть равен $\mathbf{\bar{I}}_{c-dq} = \frac{P_o + P_i}{U \mathbf{\bar{I}}}$ и не содержать переменных составляющих. Из этого условия и находятся компоненты выходного тока АФ $i_a^{\%}, i_b^{\%}$.

Для обратного преобразования в $a-b-c$ координаты применяется обратное преобразование Парка (14) и Кларка (15).

$$\begin{aligned} i_a^{\%} &= i_d^{\%} \cdot \cos q - i_q^{\%} \cdot \sin q \\ i_b^{\%} &= i_d^{\%} \cdot \sin q + i_q^{\%} \cdot \cos q \end{aligned} \quad (14)$$

где $i_d^{\%}, i_q^{\%}$ – ток фильтра в $d-q$ координатах.

$$\begin{pmatrix} i_{*a} \\ i_{*b} \\ i_{*c} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & 0 \\ -\frac{1}{3} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_a^{\%} \\ i_b^{\%} \end{pmatrix} \quad (15)$$

где $i_a^{\%}, i_b^{\%}$ – ток фильтра в $a-b$ координатах

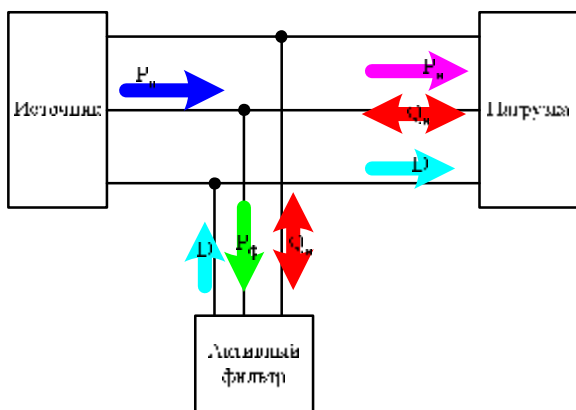


Рисунок 4 – Потoki мощности в системе «источник-АФ-нагрузка»: P_e – активная мощность, отбираемая из сети; P_i – активная мощность, потребляемая нагрузкой; P_o – мощность потерь в активном фильтре;

Q_i – реактивная мощность, потребляемая/генерируемая нагрузкой; Q_o – реактивная мощность, потребляемая/генерируемая активным фильтром; D – мощность искажений

$D-q$ метод по высшим гармоникам отличается от $d-q$ метода по основной частоте тем, что система координат $d-q$ вращается с частотой выбранной гармоники, а получаемые проекции вектора тока фильтруются с помощью фильтров нижних частот. Конечным результатом обработки является вектор тока выбранной гармоники. Этот метод применяется в случае необходимости подавления отдельно выбранных гармонических компонент тока нагрузки.

Метод следящей синхронизации (SDM) Формирование токов фильтра может быть осуществлено двумя способами: по условию равенства мощностей

фаз ($P_a = P_b = P_c$) или по условию равенства эквивалентных сопротивлений фаз ($R_a = R_b = R_c$). В первом случае мощность равномерно распределяется по фазам, независимо от соответствующих фазных напряжений:

$$i_a(t) = \frac{2u_a(t) \cdot \bar{p}(t)}{3U_{am}^2}; \quad (16)$$

$$i_b(t) = \frac{2u_b(t) \cdot \bar{p}(t)}{3U_{bm}^2}; \quad (17)$$

$$i_c(t) = \frac{2u_c(t) \cdot \bar{p}(t)}{3U_{cm}^2}; \quad (18)$$

где U_{am}, U_{bm}, U_{cm} – амплитуды соответствующих фазных напряжений. где $u_a(t), u_b(t), u_c(t)$ – мгновенные напряжения сети, $i_a(t), i_b(t), i_c(t)$ – мгновенные токи сети.

Постоянная составляющая мощности $\bar{p}(t)$, потребляемой нагрузкой, определяется как

$$\bar{p}(t) = \int_{t-T}^t (p_a(t) + p_b(t) + p_c(t)) dt = \quad (19)$$

$$= \int_{t-T}^t (u_a(t) \cdot i_a(t) + u_b(t) \cdot i_b(t) + u_c(t) \cdot i_c(t)) dt$$

где T – период частоты сети.

В основе частотных методов лежит математический аппарат спектрального анализа, главным образом дискретное преобразование Фурье (ДПФ). Выходной ток АФ формируется следующим образом. Посредством ДПФ производится получение изображения тока нагрузки в частотной области (пофазно). После этого производится коррекция вектора первой гармоники тока с целью устранения квадратурной составляющей и обеспечения выполнения баланса мощности (см. выше, $d-q$ метод). Затем к полученному спектру тока возможно применение коррекции запаздывания в силовой части АФ – инверторе и интерфейсном фильтре. Наконец, посредством обратного ДПФ производится переход во временную область с последующим формированием управляющих воздействий на инвертор.

Для выполнения ДПФ и обратного ДПФ используются алгоритмы быстрого преобразования Фурье (БПФ) и рекурсивного дискретного преобразования Фурье (РДПФ).

Алгоритм БПФ заключается в разделении преобразования массива (последовательности) длиной N выборок на два преобразования с длинами $N/2$ и последующим объединением результатов. Процесс деления пополам может продолжаться до тех пор, пока длина преобразования не станет нечетной. Наиболее эффективно БПФ при исходной длине последовательности, равной $N = 2^m$, где m – целое число. В этом случае количество вычислений снижается с N^2 операций до $N \cdot \log_2(N)$.

Алгоритм РДПФ отличается тем, что вычисление производится в скользящем окне. Различие между «старым» и «новым» окнами заключается в первой и

последней выборках. Как только результат дискретного преобразования Фурье для «старого» окна получен, расчет уже имеющихся значений выборок исключается.

Выводы. Описанные методы управления активными фильтрами имеют различные особенности и области применения. Так, метод SDM, реализующий равенство эквивалентных сопротивлений фаз, дает минимальные потери в сети, $d-q$ метод формирует симметричную трехфазную синусоидальную систему токов независимо от наличия высших гармоник и несимметрии напряжения. Подавление интергармоник (в частности, субгармоник) тока несложно реализовать путем соответствующей модификации алгоритма управления АФ. $D-q$ метод по высшим гармоникам в переделе переходит в частотные методы, что обуславливает возможность коррекции запаздывания в инверторе и фильтре. Алгоритмы с применением РДПФ характеризуются меньшим запаздыванием по сравнению с алгоритмами, использующими БПФ, где запаздывание составляет не менее одного периода частоты сети. Метод, основанный на теории мгновенной мощности, может быть эффективно использован для устранения пульсаций момента на валу маломощного генератора автономной системы электроснабжения, однако дает неудовле-

творительные результаты в условиях несимметрии или несинусоидальности напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 13109-97.
2. Бурлака В.В., Гулаков С.В., Бублик С.К., Дяченко М.Д. Параллельный активный фильтр с повышенным коэффициентом подавления высших гармоник тока// Вестник ПГТУ.– 2009.
3. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. — М.: Энергоатомиздат, 2005. — 262 с.
4. Moleykutty G. Performance Comparison of Three-Phase Shunt Active Power Filter Algorithms / G. Moleykutty, Kartik Prasad Basu // American Journal of Applied Sciences 5 (11).–2008. P. 1424–1428.
5. Joao L.A. P-Q Theory Power Components Calculations// IEEE International Symposium on Industrial Electronics Rio de Janeiro, Brasil, 2003.

Стаття надійшла 07.03.2011 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Сінчуком О.М.

ОГЛЯД МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ АКТИВНИМИ ФІЛЬТРАМИ

*Бурлака В.В., ас., Поднебенна С.К., ст. викл., Дяченко М.Д., к.т.н., доц.
Приазовський державний технічний університет, м. Маріуполь
вул. Університетська, 7, 87500, м. Маріуполь, Україна
E-mail: podsvet@gmail.com*

Розглянуто методи управління активними фільтрами – часові: метод, що базується на теорії миттєвої потужності (p-q метод), метод слідуючої синхронізації (SDM), метод, що ґрунтується на математичних перетвореннях Кларка і Парка (d-q метод), та частотні: швидкого перетворення Фур'є та рекурсивного дискретного перетворення Фур'є.

Ключові слова: активний фільтр, теорія миттєвої потужності, перетворення Кларка і Парка.

REVIEW OF ACTIVE POWER FILTER CONTROL TECHNIQUES

*Burlaka V., ass., Podnebennaya S., Sen. Lect., D'yachenko M., Cand. of Sc. (Tech.), Assoc. Prof.
Priazov state technical university,
vul. University, 7, 87500, Mariupol, Ukraine
E-mail: podsvet@gmail.com*

Several active power filter control techniques are compared in terms of realization complexity and performance level. Control techniques involved are: synchronous detection method (SDM), instantaneous (p-q) theory, instantaneous direct and quadrature (d-q) current method, fast Fourier transform and recursive discrete Fourier transform methods.

Key words: active power filter, instantaneous power theory, Clarke and Park transformations.