

Расчет емкости конденсатора в цепи постоянного тока активного фильтра гармоник

А.С. Плехов, Д.Ю. Титов, Е.А. Чернов

Структурная схема активного фильтра гармоник (АФГ) показана на рис. 1. АФГ предназначен для компенсации высших гармонических составляющих и интергармоник тока и напряжения в эквивалентных элементах нагрузки z_{ab} , z_{bc} , z_{ca} основных электроприемников, требующих синусоидального напряжения питания, а также в элементах $z_{ла}$, $z_{лb}$, $z_{лc}$ отображающих параметры источников энергии и линии связи системы электроснабжения. Как показано в [1, 2, 3, 4, 5, 6] работа АФГ позволяет избежать потерь и перенапряжений в указанных элементах.

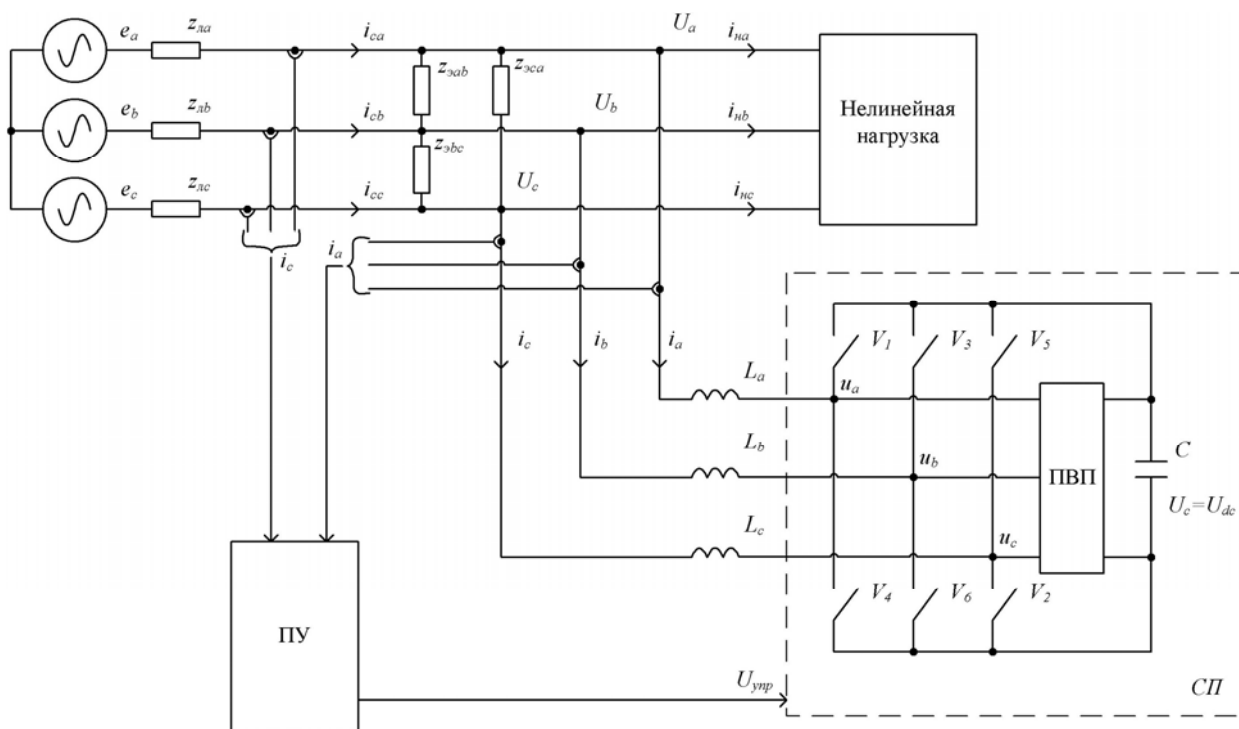


Рис. 1. - Структурная схема активного фильтра гармоник

Параллельный АФГ содержит силовую подсистему (СП) и подсистему управления (ПУ). ПУ рассчитывает необходимый ток компенсации и формирует сигналы управления ключами СП. Компенсационный ток зависит от состояний каждого из силовых ключей, которые приведены в табл. 1. Для

повышения напряжения на конденсаторе используется повышающий выпрямительный преобразователь - ПВП.

Таблица №1

Состояние ключей силовой подсистемы АФГ

№ состояния k	Силовые ключи						Коэффициенты переключения		
	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	k_a	k_b	k_c
0	0	1	0	1	0	1	0	0	0
1	0	0	0	1	1	1	-1/3	-1/3	2/3
2	0	1	1	1	0	0	-1/3	2/3	-1/3
3	0	0	1	1	1	0	-2/3	1/3	1/3
4	1	1	0	0	0	1	2/3	-1/3	-1/3
5	1	0	0	0	1	1	1/3	-2/3	1/3
6	1	1	1	0	0	0	1/3	1/3	-2/3
7	1	0	1	0	1	0	0	0	0

Энергообменный конденсатор C предназначен для обеспечения компенсационного тока в непосредственной близости от нелинейной нагрузки, благодаря чему ток, обусловленный высшими гармониками и интергармониками, не будет потребляться от источника e_a, e_b, e_c .

Напряжение на конденсаторе на стороне постоянного тока должно быть с минимальными пульсациями и достаточным, чтобы обеспечивать компенсацию неактивных составляющих тока АФГ. Искажение напряжения на конденсаторе вызваны активными потерями в СП и мощностью искажений нелинейной нагрузки. Большая емкость благоприятна, так как позволяет стабилизировать напряжение на конденсаторе в установившемся режиме. Но увеличение емкости приведет к большему объему и большей стоимости конденсатора.

В симметричной системе электроснабжения действуют напряжения, для которых справедливо:

$$e_a + e_b + e_c = 0,$$

и ток сети:

$$i_{ca} + i_{cb} + i_{cc} = 0.$$

Поэтому описать работу АФГ можно следующими дифференциальными уравнениями:

$$\begin{cases} L_a \frac{di_a}{dt} = U_a - u_a \\ L_b \frac{di_b}{dt} = U_b - u_b \\ L_c \frac{di_c}{dt} = U_c - u_c \end{cases}, \quad (1)$$

где u_a, u_b, u_c - выходные напряжения АФГ и вычисляются как $u_a = k_a U_c, u_b = k_b U_c, u_c = k_c U_c$, где k_a, k_b, k_c - коэффициенты переключения.

Как видно из таблицы 1, при любом состоянии k сумма $k_a + k_b + k_c = 0$. Таким образом, выходные напряжения АФГ соответствуют требованиям к симметричной системе трехфазных напряжений.

Включение-выключение коммутационного прибора в АФГ определяется знаком Δi_a в текущий момент. Например, для фазы A , $k_a < 0$, когда $\Delta i_{aa} > 0$; наоборот, $k_a > 0$, когда $\Delta i_{aa} < 0$. Таким образом, ошибка между рассчитанным током и фактическим током может быть снижена, и компенсационный ток будет приближен к рассчитанному току.

Рассмотрим случай, когда номер состояния силовой подсистемы $k = 5$, тогда ток фазы A и фазы C должен уменьшаться, а в фазе B увеличиваться. Ключ V_1 фазы A , ключ V_5 фазы C и ключ V_6 фазы B - замкнуты. Коэффициент переключения каждого плеча моста может быть учтен из таблицы 1: $k_a = \frac{1}{3}$,

$k_b = \frac{-2}{3}, k_c = \frac{1}{3}$. Тогда (1) можно записать как:

$$\begin{cases} L_a \frac{di_a}{dt} = U_a - \frac{1}{3} U_{dc}; \\ L_b \frac{di_b}{dt} = U_b + \frac{2}{3} U_{dc}; \\ L_c \frac{di_c}{dt} = U_c - \frac{1}{3} U_{dc}. \end{cases}$$

Управляемые токи i_a , i_c должны уменьшаться и i_b увеличиваться. Дифференциальные токи АФГ должны удовлетворять следующим выражениям: $\frac{di_a}{dt} \leq 0$, $\frac{di_b}{dt} \geq 0$, $\frac{di_c}{dt} \leq 0$.

Мощность искажения T_u , которая вызывает изменение напряжения на конденсаторе на стороне постоянного тока, может быть рассчитана следующим выражением [3, 7]:

$$T_u = \sqrt{3}U \sum_{n=2}^{\infty} I_n = \mp \sqrt{3}U \sum_{n=2}^{\infty} I_{nn} \cos[(n \pm 1)\omega \cdot t + \varphi_n], \quad (2)$$

где U – действующее значение напряжения 1-ой гармоники источника.

Номера гармоник n прямой последовательности вычисляются согласно выражению:

$$n = 6k + 1,$$

где k – ряд натуральных чисел ($k = 1, 2, 3, \dots$).

Номера гармоник n обратной последовательности:

$$n = 6k - 1.$$

В (2) верхний знак используется, если рассчитываются гармоники обратной последовательности, и нижний знак если - прямой.

Рассмотрим случай, когда нелинейная нагрузка (рис. 1) - неуправляемый трехфазный мостовой выпрямитель. Спектр высших гармоник генерируемых выпрямителем определяется выражением:

$$n = mk \pm 1,$$

где m – пульсность выпрямителя.

Шестипульсный выпрямитель генерирует 5, 7, 11, 13, 17 и 19 гармоники. Тогда искажение напряжения на конденсаторе, вызванное этими гармониками может быть рассчитано из (2):

$$\begin{aligned} T_u \approx \sqrt{3}U \cdot (-I_{5n} \cos[6\omega \cdot t + \varphi_5] + I_{7n} \cos[6\omega \cdot t + \varphi_7] - \\ - I_{11n} \cos[12\omega \cdot t + \varphi_{11}] + I_{13n} \cos[12\omega \cdot t + \varphi_{13}] - \\ - I_{17n} \cos[18\omega \cdot t + \varphi_{17}] + I_{19n} \cos[18\omega \cdot t + \varphi_{19}]). \end{aligned} \quad (3)$$

Это искажение зависит главным образом от 5-ой гармоники, т.е. от гармоники, имеющей наибольший период и наибольшую амплитуду. Поэтому период, на котором стабилизируется напряжение на конденсаторе, должен составлять $T/12$, где T -период сетевого напряжения. Мощность искажения T_u компенсируется током АФГ, поэтому энергия на интервале $T/12$, отдаваемая конденсатором C , за счет изменения напряжения ΔU_{dc} , должна быть не менее энергии искажения на этом периоде. Емкость может быть рассчитана [8] с учетом (3) согласно выражению:

$$\int_0^{T/12} T_u dt = \frac{1}{2} C [U_{dc} + \Delta U_{dc}]^2 - \frac{1}{2} C U_{dc}^2. \quad (4)$$

С другой стороны, мощность искажения можно определить [9, 10]:

$$T_u = S_1 \cdot THD_i,$$

где S_1 - полная мощность первой гармоники нелинейной нагрузки; THD_i - суммарное гармоническое искажение.

В [9] определено THD_i для различных типов нелинейных нагрузок. Если нагрузка специфична, то величина THD_i определяется посредством измерений.

Ток, протекая по элементам силовой цепи преобразователя, вызывает дополнительные потери активной мощности. Поэтому необходимо учесть потери в инверторе АФГ. IGBT модули инвертора состоят из IGBT транзистора и параллельного диода. Потери на IGBT состоят из потерь в открытом состоянии P_{ss} и потерь при переключении P_{sw1} , потери на диоде складываются из потерь в открытом состоянии P_D и потерь на выключение P_{sw2} . Сумма потерь на IGBT модуле может быть выражена:

$$P_A = P_{ss} + P_{sw1} + P_{sw2} + P_D. \quad (5)$$

Потери IGBT в открытом состоянии:

$$P_{ss} = I_{CP} \cdot V_{CE}(sat) \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{D}{3\pi} \cdot \cos \varphi \right),$$

где I_{CP} - максимальное значение тока на выходе фазы; $V_{CE}(sat)$ - падение напряжения насыщения IGBT ключа при максимальном токе I_{CP} и температуре $T=125^{\circ}\text{C}$; D – коэффициент модуляции; φ - фазный угол между выходным напряжением и током.

Потери при переключении IGBT:

$$P_{sw1} = (E_{SW(ON)} + E_{SW(OFF)}) \cdot f_{SW} \cdot \frac{1}{\pi},$$

где $E_{SW(ON)}$ и $E_{SW(OFF)}$ - энергии включения и выключения ключа за импульс при пиковой амплитуде тока и температуре $T=125^{\circ}\text{C}$; f_{SW} - частота переключений.

Потери диода в открытом состоянии:

$$P_D = I_{EP} \cdot V_{EC} \cdot \left(\frac{1}{8} - \frac{D}{3\pi} \cdot \cos \varphi \right),$$

где I_{EP} - максимальное значение тока на выходе фазы; V_{EC} - прямое падение напряжения при токе I_{EP} .

Потери при выключении диода:

$$P_{sw2} = 0,125 \cdot I_{rr} \cdot t_{rr} \cdot V_{CE(pk)} \cdot f_{SW},$$

где I_{rr} - пиковый ток восстановления диода; t_{rr} - время обратного восстановления диода; $V_{CE(pk)}$ - пиковое напряжение диода.

В таблице 2 приведен расчет потерь P_A в СП АФГ, выполненной на IGBT модулях CM75DU-24F, при мощности нелинейной нагрузки 320кВА и частоте коммутаций 10 кГц.

Таблица 2

Потери в СП АФГ

P_{ss} , Вт	P_{sw1} , Вт	P_D , Вт	P_{sw2} , Вт
134,16	266,64	27	145,38

С учетом (5) емкость может быть рассчитана:

$$\int_0^{T/12} (T_u + P_A) dt = \frac{1}{2} C [U_{dc} + \Delta U_{dc}]^2 - \frac{1}{2} C U_{dc}^2.$$

Следовательно:

$$C = 2 \frac{\int_0^{T/12} (T_u + P_A) dt}{\Delta U_{dc} (\Delta U_{dc} + 2U_{dc})}. \quad (6)$$

Формула (6) позволила получить следующие зависимости емкости конденсатора (мФ) от мощности преобразователя (кВА) (сплошная линия, левая ось ординат) и емкости конденсатора, необходимой для компенсации потерь в СП АФГ (штриховая линия, правая ось ординат).

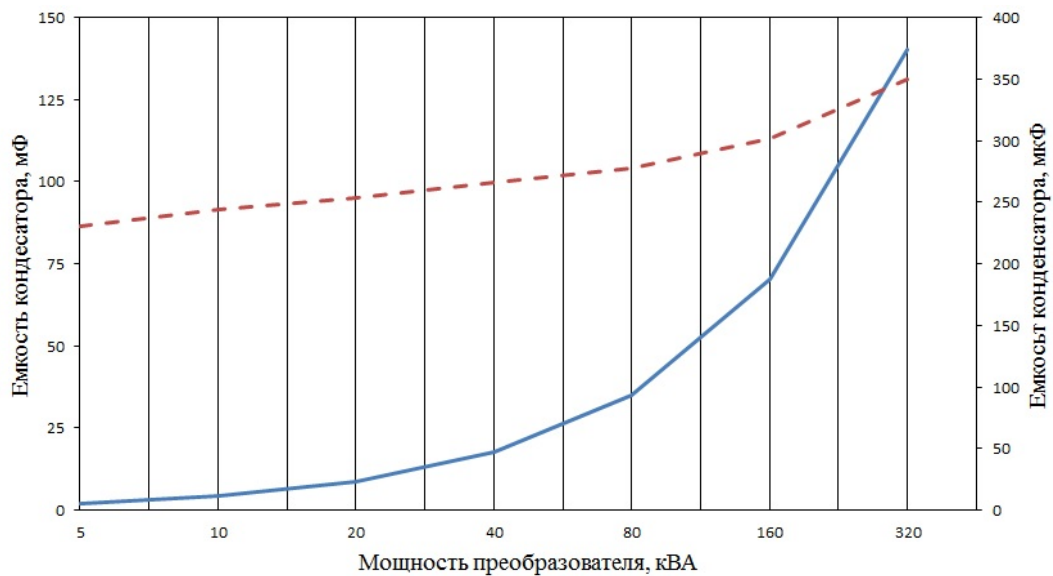


Рис. 2. – Зависимость емкости накопительного конденсатора от мощности преобразователя нелинейной нагрузки.

Выводы:

1) Емкость конденсатора линейно зависит от компенсируемой мощности нелинейной нагрузки.

2) Емкость конденсатора, необходимая для компенсации потерь в IGBT модуле, зависит от параметров модуля и частоты коммутации, и мало зависит от величины компенсационного тока. Эта емкость незначительна, ее можно не учитывать при проектировании АФГ.

Литература:

1. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий [Текст] / И. В. Жежеленко. 4-е изд., перераб. и доп.- М.: Энергоатомиздат, 2000. - 331 с.
2. Розанов, Ю. К. Силовая электроника [Текст]: учебник для вузов / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А. А. Кваснюк. – 2-е изд., стереотипное. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 632 с.
3. Akagi, H. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning / H. Akagi, E.H. Watanabe, M. Aredes // IEEE Press Editorial Board, 2007, 400 p.
4. Fang Zheng Peng. Application issues of active power filters / Fang Zheng Peng // Industry Application Magazine, IEEE (Volume: 4, Issue: 5), 1998, pp/ 21-30.
5. Tennakoon, S. B. An active filter for eliminating harmonics and interharmonics in the input current to an AC voltage controller for refrigeration and air-conditioning applications / S. B. Tennakoon, M. H. Jodeyri, N. Y. A. Shammass, T. Lehal // European Conference on Power Electronics and Applications, 2005, pp 1-10.
6. Зиновьев, Г. С. Силовая электроника [Текст]: учеб. пособие для бакалавров / Г. С. Зиновьев. – 5-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во Юрайт, 2012 . – 667 с.
7. Чаплыгин, Е. Е. Теория мощности в силовой электронике [Текст] / Е.Е. Чаплыгин, Н. Г. Калугин // Учеб. пособие, М.: Московский энергетический институт, 2006, 56 с.
8. Чивенков, А. И. Расширение функциональных возможностей инвертора напряжения систем интеграции возобновляемых источников энергии и промышленной сети [Электронный ресурс] / А. И. Чивенков, В. И. Гребенщиков, А. П. Антропов, Е. А. Михайличенко // «Инженерный вестник Дона», 2013. №1. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1564> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. Рус.
9. Титов, В. Г. Управление энергосберегающими полупроводниковыми преобразователями [Электронный ресурс] / В. Г. Титов, А. С. Плехов, К. А. Бинда, Д. Ю. Титов // «Инженерный вестник Дона», 2013. №4. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1909> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. Рус.
10. Тихомиров В.А. Сравнительный анализ гармонического состава сетевого тока управляемых выпрямителей и преобразователей частоты // В.А. Тихомиров, С.В. Хватов // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева. Нижний Новгород: Изд-во НГТУ им. Р.Е. Алексева, 2011. №3 (90), с. 204-215.