

Использование косинусных конденсаторов в схемах низковольтных фильтрокомпенсирующих устройств

Высокая эксплуатационная надежность низковольтных МКК-конденсаторов допускает их эффективное использование в цепях фильтрокомпенсирующих устройств и многофазных схем преобразования.

**Сергей Шишкин,
к. т. н.**

shishkin53@mtu-net.ru

Рост мощностей нелинейных нагрузок низковольтных сетей электроснабжения и вызываемое ими ухудшение показателей качества электроэнергии увеличивает потребность в установке фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ) — комбинации резонансных конденсаторно-реакторных звеньев, настроенных на частоты гармоник. В то же время электродинамические и тепловые нагрузки, обусловленные повышенными амплитудами гармоник, препятствуют применению в ФКУ косинусных конденсаторов (КК), наиболее распространенной группы силовых конденсаторов, изначально предназначенных для коррекции коэффициента мощности.

Нагрев КК определяется корреляцией внутренних потерь — ΔP и тепловой мощности рассеивания — P_{th} . Конструкция цилиндрических алюминиевых КК (табл. 1) предполагает рассеивание тепла путем конвективного теплообмена между обкладками, корпусом и окружающей средой. Относительно среднесуточной температуры окружающей среды P_{th} можно считать постоянной, а ΔP пропорциональными R_{ESR} — эквивалентному последовательному сопротивлению (Equivalent Series Resistance) конденсатора и

$$I_{RMS} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} I_n^2}$$

Таблица 1. Основные технические данные цилиндрических косинусных конденсаторов различного технологического исполнения

Наименование параметра	МКР-технология, тип			МКК-технология, тип			МКВ-технология, тип		
	Phi Cap**	CSADP1***	серия 275.xxx Констр. L/M*	Phase Cap**	Phase Cap HD**	Wind Cap**	MKV Cap**	CLADV11***	серия 274.xxx Констр. L/M*
Соответствие стандартам	IEC 60831-1,2/96	IEC 60831-1,2/96; EN 60831-1,2/96; GOST 1282/96	IEC 831-1,2; VDE 0560-46/47	IEC 831-1/96; IEC 831-2/95; EN 60831-1,2/96; VDE-560-46,47 3/95		IEC 831-1,2/88; EN 60831-1,2/93; VDE-560-46,47 3/95		IEC 831-1,2/96; EN 60831-1,2/96; EN ?SN 60831-1/93, 2/97	IEC 60831/96; VDE 0560-46/47
Номинальная мощность, квар	0,4–25	1,0–50	0,83–50	2,5–28,15	28–50	5–28	7,5–15	3,0–27	5–20
Номинальное напряжение, U _н , В	220–525	400–525	230–800	230–740	400–525	690–800	400–690	440–525	400–690
Наибольшее допустимое напряжение	1,1·U _н до 8 ч, 1,15·U _н до 30 мин за 24 ч; 1,2·U _н макс. 5 мин; 1,3·U _н макс. 1 мин			1,1·U _н до 8 ч, 1,15·U _н до 30 мин; 1,3·U _н в течение 1 мин		1,1·U _н до 8 ч, 1,15·U _н до 30 мин за 24 ч; 1,2·U _н макс. 5 мин; 1,3·U _н макс. 1 мин	1,1·U _н до 8 ч за 24 ч; 1,3·U _н в течение 1 мин	1,1·U _н до 8 ч, 1,15·U _н до 30 мин за 24 ч; 1,2·U _н макс. 5 мин; 1,3·U _н макс. 1 мин	
Длительно допустимая токовая перегрузка	1,3×I _н			1,3×I _н	1,6×I _н	1,5×I _н	1,8×I _н (мин)	1,5×I _н	2,0×I _н
Максимальный пусковой ток	100×I _н	200×I _н	130×I _н	200×I _н		300×I _н		200×I _н	300×I _н
Допустимое отклонение емкости, %	–5/+10		–5...+15; ±5	±5			–5/+10		–5/+15
Срок службы, ч	100 000		100 000–130 000	115 000	130 000		150 000	130 000	175 000
Потери, Вт/квар	>0,5	0,25	0,25...0,4	>0,25	>0,2			>0,25	>0,2
Рабочая температура, °С	–25/+55	–45/+55	–40/+25	–40/+55	–25/+55	–40/+55	–25/+70	–45/+55	–25/+70

Примечание: производство — *Electronicon, **EPCOS AG, ***ZET SILKO.

— среднеквадратичному значению протекающих через КК гармонических составляющих тока:

$$\Delta P = I_{\text{RMS}}^2 \times R_{\text{ESR}}. \quad (1)$$

В свою очередь R_{ESR} обратно пропорционально частоте n -гармоники (f_n) и емкости (C) — сотни мкФ для номинальных значений мощностей КК (табл. 1):

$$R_{\text{ESR}} = \frac{1}{2\pi f_n C}. \quad (2)$$

Поскольку КК является элементом, поглощающим сетевые гармоники, при расчете эквивалентной (входной) проводимости резонансного реактивного звена ФКУ именно R_{ESR} , а следовательно, I_{RMS} и ΔP конденсаторного модуля (1, 2) будут определяющими. Например, с учетом одновременной фильтрации 3, 5, 7 и 11-й гармоник, I_{RMS} ступени фильтрационных установок компенсации реактивной мощности (последовательного соединения индуктивности реактора L и емкости КК) можно записать как [1, 2]:

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2}. \quad (3)$$

В зависимости от частотной расстройки — смещения собственной частоты LC-цепи (f_r) по отношению к частоте основной ($f_n = 50$ Гц) гармоники, полоса пропускания (степень фильтрации) гармонических составляющих I_{RMS} ступени будет различной (табл. 2). Поэтому увеличение ΔP конденсаторного модуля в режиме фильтрации (1) при постоянном номинальном напряжении сети $U_{\text{НОМ}}$ будет обусловлено превышением I_{RMS} (3) над I_1 — током первой (основной) гармоники. Считая R_{ESR} (2) соразмерным коэффициенту частотной расстройки $n = f_r/f_1$ [1], для ступеней ФКУ (табл. 2) предельное повышение I_{RMS} и ΔP составит: 13,2% и 35,7% ($f_r = 135$ Гц); 11,8% и 44,8% ($f_r = 190$ Гц); 10,85% и 46,7% ($f_r = 215$ Гц). С учетом предельно допустимого 10-процентного установившегося отклонения $U_{\text{НОМ}}$ [3], длительная токовая нагрузка КК (I_{RMS}/I_1) достигнет значений: 114,6% ($f_r = 135$ Гц); 113% ($f_r = 190$ Гц); 112% ($f_r = 215$ Гц), а рост ΔP : 39% ($f_r = 135$ Гц); 49% ($f_r = 190$ Гц); 51% ($f_r = 215$ Гц). При этом, в зависимости от f_r , номинальное напряжение КК U_H (табл. 1) должно быть увеличено на 10–20% [2].

Современные низковольтные КК (стандарты IEC 831-1,2; EN 60831-1,2) изготавливаются с различным технологическим исполнением рабочей части, оказывающей непосредственное влияние на возможность их использования в качестве реактивного элемента ФКУ, которая определяется адекватностью технических параметров конденсатора (табл. 1) режиму фильтрации в низковольтных системах электроснабжения общего назначения (стандарты IEC 1000-2-2; DIN ENV VV61000-2-2).

Известно, что КК, выполненные по МКР-технологии (концентрически намотанная на изолированный металлический стержень односторонне металлизированная алюминиево-цинковым сплавом полимерная пленка, выполняющая функцию диэлектрической

Таблица 2. Степень фильтрации спектра гармонических составляющих I_{RMS} LC-ступени фильтрационных установок Rectimat 2 производства Schneider Electric [1]

Номер гармоники	Предельно допустимое значение $K_{U(n)} \text{ пред} [3]^*$, %	Степень фильтрации ступени, %		
		Собственная частота расстройки LC-цепи 135 Гц	Собственная частота расстройки LC-цепи 190 Гц	Собственная частота расстройки LC-цепи 215 Гц
I_3	7,0	6	3	2
I_5	9,0	17	44	69
I_7	7,5	6	13	19
I_{11}	5,25	2	5	6

Примечание: $K_{U(n)}$ — коэффициент n -ой гармонической составляющей трехфазной четырехпроводной сети с номинальным напряжением 0,38 кВ. Соотношение между предельно допустимой и допустимой величиной $K_{U(n)}$: $K_{U(n)} \text{ пред} = 1,5 \times K_{U(n)} \text{ доп}$ [3]. Значения $K_{U(n)} \text{ доп}$ [3] полностью соответствуют рекомендации CIGRE — Международной конференции по большим электрическим системам.

обкладки активной части конденсатора, с последующим заполнением объема корпуса инертным газом или нетоксичным компаундом [4]), плохо адаптированы к наличию в спектре напряжения гармонических составляющих [2]. Согласно [3], в точках общего присоединения низковольтных ($U_{\text{НОМ}} = 0,38$ кВ) электрических сетей нормально допустимое значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения — K_U составляет 8%. Характерным повреждением данных КК при длительном превышении 5-процентного уровня K_U является деформация и показанное на рисунке последующее разрушение края металлизированной пленки в месте напыления кромки контактного слоя проводящих обкладок секций [2]. Кроме того, из-за поверхностных изломов пленки уменьшается толщина и диэлектрическая прочность периферийной части обмоток, а вследствие краевого эффекта (pinch effect), увеличивается концентрация зарядов на торцах проводящих обкладок. Непрерывное воздействие гармоник протекающего тока приводит к постоянному пробое диэлектрика и последующим многочисленным процессам «самовосстановления», предотвращающим замыкание проводящих обкладок [4]. В результате давление внутри корпуса увеличивается, происходит срабатывание встроенного устройства аварийного отключения, и КК выходит из строя [4].

Более приспособлены к гармоническим искажениям питающего напряжения КК, использующие МКВ-технологии конструктивного построения [2]. Двухсторонне металлизированная конденсаторная бумага с цинковым контактным слоем на краях секций, изолированная пропиленовой пленкой и пропитанная минеральным маслом, повышает импульсную прочность диэлектрической системы, так как низкие собственные потери и хорошая теплопроводность позволяют увеличить ее допустимый нагрев (табл. 1). Наличие бумаги способствует равномерности концентрации непроводящей области, образующейся на месте пробоя металлизированного покрытия.

Во многом идентичные технические характеристики и электродинамические свойства (табл. 1) имеют «сухие» металлопленочные КК на основе МКК-технологии [2]. Расширение площади контактной поверхности за счет сочетания ровного и «волнового» среза (wavy cut) кромок пленки диэлектрика [2] и специального утолщения цинкового напы-

ления торцевых сторон проводящих обкладок, уложенных с небольшим смещением витков, обеспечивает прохождение через КК без повреждения обмоток коммутационных импульсов, до 200–300 раз превосходящих номинальный ток конденсатора — I_H (табл. 1). Изменяющаяся поперечная толщина и сегментная композиция слоя металлизации локализует зоны пробоя проводящей обкладки между участками с максимальным и минимальным сопротивлением [5]. Снижение удельного объема и массы конденсаторов Phase Cap при равенстве номинальной мощности и U_H соответственно составит 50% и 95–135% (относительно КК с МКВ-технологией производства EPCOS AG) [2]; 15–35% и 15–145% (Electronicon*); 15–25% и 65–110% (ZEE SILKO*). Следует также отметить меньший диапазон мощностей выпускаемых МКВ-конденсаторов.

Отмеченные особенности конструктивного построения позволяют использовать МКК-конденсаторы в схемах ФКУ силовых промышленных преобразователей. Например, КК серии Phase Cap HD (табл. 1) установлены в многозвенных входных фильтрах, рассчитанных на подавление 5, 7 и 11-й гармоник, источников непрерывного электроснабжения (UPS) серии S мощностью до 300 кВ·А, серийно выпускаемых компанией Masterguard GmbH. Кроме того, в сглаживающем фильтре на выходе блока преобразователя частоты (IGBT-инвертора) также установлены конденсаторы Phase Cap, несмотря на присутствие в схеме импульсов напряжения широтно-импульсной модуляции (PWM) с большой крутизной фронта, являющихся крайне неблагоприятным фактором режима работы КК. Аналогично, в статических преобразователях частоты (SFC) асинхронных генераторов ветроэнергетических установок применяются КК серии Wind Cap [2], имеющие повышенные



значения U_H и максимального пускового тока (табл. 1).

Таким образом, высокая эксплуатационная надежность низковольтных МКК-конденсаторов допускает их эффективное использование в цепях ФКУ и многофазных схем преобразования, существенно расширяя функциональные возможности применения КК, что, в свою очередь, способствует обеспечению электромагнитной совместимости нелинейных нагрузок потребителей электрической энергии с питающей сетью. ■

Литература

1. Guide for the design and production of LV compensation cubicles. Schneider Electric Industries SAS. France. 2002.
2. Power Factor Correction. Product Profile. Catalog EPCOS AG. Ordering No EPC: 26004-7600. Germany. 2001.
3. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Минск: ИПК Издательство стандартов. 1998.

4. Шишкин С. А. Косинусные конденсаторы для установок автоматической компенсации реактивной мощности // Электрика. № 10. 2003.
5. EP 1060488 H01G4/015, 4/008. Metal-plating for self-healing foil capacitors. Vetter, Harold (DE). Priority: 17.02.1998 DE 4328615.

*В статье использованы материалы сайтов:

www.epcos.com;
www.zez-silko.cz;
www.electronicon.com;
www.dialelectrolux.ru.