

ДОПУСТИМАЯ ПЕРЕГРУЗКА КОНДЕНСАТОРОВ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

Викладається сутність методики, що пропонується для визначення допустимого навантаження конденсаторів установок для компенсації реактивного навантаження електричних мереж з вищими гармоніками струму.

Излагается сущность методики, которая предлагается для определения допустимой нагрузки конденсаторов установок для компенсации реактивной нагрузки электрических сетей с высшими гармониками тока.

This is research of a new method to define coefficients over-load capacitors using to compensate reactive power in electric system with higher harmonics.

Известно, что в системах электроснабжения (СЭС) потребителей электроэнергии (ЭЭ), как составной части электроэнергетической системы (ЭЭС), для поддержания баланса реактивной мощности (энергии) наиболее приемлемыми являются конденсаторные установки (КУ). Их конденсаторы используются как дополнительный “источник” реактивной ЭЭ в СЭС конкретного потребителя, при дефиците которой физически невозможна передача ему активной электроэнергии в требуемом объеме.

Применение конденсаторов в электрических сетях (ЭС) позволяет уменьшить активные потери в таких сетях, увеличить их пропускную способность и повысить уровень напряжения в точке их включения. Поэтому наиболее широко КУ применяются в СЭС потребителей ЭЭ.

По сравнению с другими “источниками” реактивной электроэнергии, КУ имеют преимущества, главным образом потому, что активные потери в них имеют самые низкие значения. При этом допускается большая свобода выбора их мощности и места установки, а их мощность может изменяться в пределах от 5 кВАр до 25 Мвар и более [6]. Их можно присоединить практически в любой точке ЭС и их важным достоинством является также то, что их установленная мощность может постепенно увеличиваться плавно или ступенчато путем присоединения

новых секций по мере увеличения реактивной нагрузки.

Основным недостатком конденсаторов является зависимость их мощности от напряжения

$$Q_K = \left(\frac{U_K}{U_{\text{ном}}} \right)^2 Q_{\text{ном}}, \quad (1)$$

где $Q_K, Q_{\text{ном}}$ – реальная и номинальная мощности конденсатора; $U_K, U_{\text{ном}}$ – реальное и номинальное напряжения конденсатора.

Таким образом, имеется реальная возможность перегрузки конденсаторов за счет либо увеличения питающего напряжения или тока, либо воздействия обоих факторов одновременно. Такая опасность появляется, прежде всего, в том случае, если в СЭС конкретного потребителя имеются нелинейные нагрузки.

В соответствии с международными нормами, конденсаторы разрешается перегружать [8]: по напряжению не более чем на 10 %, по току не более чем на 30 %.

Цель данной работы – определение величины допустимой перегрузки конденсаторов по току и напряжению одновременно определение их допустимой перегрузки по мощности в СЭС общего назначения.

Система электроснабжения общего назначения представляется совокупностью электроустановок, которая предназначена для снабжения ЭЭ установленного качества электроприемников (ЭП) различного технологического назначения.

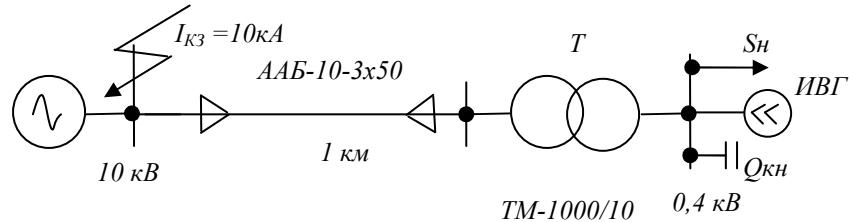


Рис.1. Принципиальная схема СЭС общего назначения

Часть этих ЭП могут иметь нелинейное сопротивление (например, полупроводниковые преобразователи), которые при синусоидальном напряжении ЭЭС потребляют несинусоидальный или прерывистый ток. При этом, в зависимости от номинальной мощности таких ЭП, может происходить нарушение синусоидальности напряжения не только в рассматриваемой СЭС, но и в электрических сетях ЭЭС. Принципиальная схема такой СЭС представлена на рис.1.

Как известно из [1], “...Электрическая энергия от места ее генерирования передается к месту потребления по диэлектрику (*проводы же в линиях передачи выполняют двоякую роль: они являются каналами, по которым проходит ток, и организаторами структуры поля в диэлектрике*).”

Вполне очевидно, что поставленную выше задачу невозможно решить без применения моделирования, которое предполагает создание определенного объекта для закрепления интересующего режима работы конденсаторов в конкретной СЭС и детального изучения их режима. Согласно [2] такой мысленный либо реальный объект является моделью для изучения поставленной задачи.

Если необходимо изучение физических процессов в оригинале, применяют идейно-теоретическую модель, а в случае определения расчетных величин его режима – реально-математическую модель.

Идейно-теоретическое моделирование, проведенное в [4], подтверждает положение о том, что реактивная ЭЭ представляет собой поперечную составляющую энергии указанного поля как энергии объемной поляризации упругой диэлектрической среды, окружающей все токоведущие части СЭС (в том числе и ЭП). Она из ЭЭС не передается и в СЭС не потребляется (в другие виды энергии

не превращается), а является внутренней энергией СЭС.

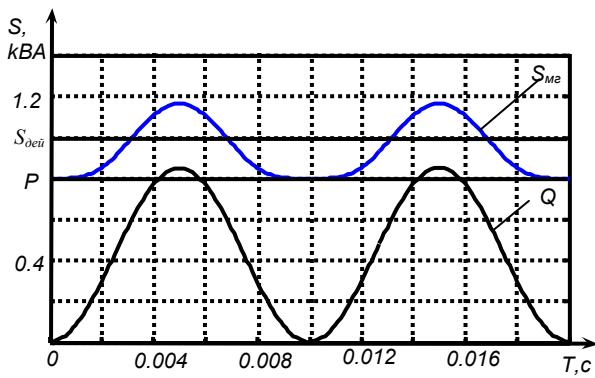
Как утверждается в [7], реактивная ЭЭ образуется в любой точке электрических цепей тока проводимости СЭС в результате одновременного воздействия на диэлектрическую среду индуктивности и емкости в этой точке, которыми она реально обладает.

Если в указанной точке реально преобладает индуктивность, то это энергия растянутой пружины (витки катушки отталкиваются при одностороннем направлении тока в них). В механике энергии реальной растянутой пружины присваивается знак плюс, а в электроэнергетике реактивную энергию со знаком плюс условно считают “потребительной”.

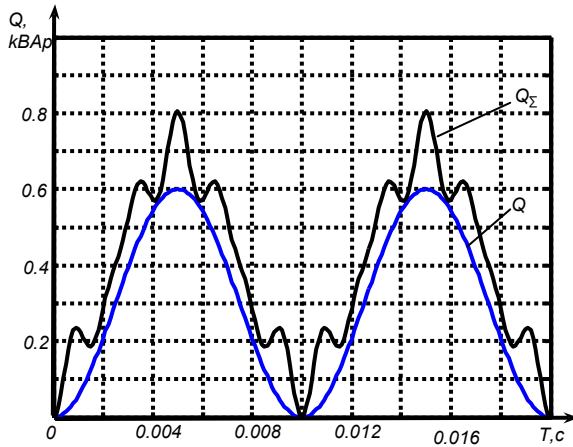
Если в указанной точке реально преобладает емкость, то это энергия сжатой пружины (обкладки конденсатора притягиваются, не зависимо от полярности их заряда). В механике энергии реальной сжатой пружины присваивается знак минус, а в электроэнергетике реактивную энергию со знаком минус условно считают “генерированной”.

Периодического сжатие-растяжение упругой диэлектрической среды в поперечном направлении (относительно тока проводимости токоведущих частей СЭС) придает процессу передачи ЭЭ волновой характер как волны энергии электромагнитного поля СЭС.

Очевидно, что при синусоидальном токе и напряжении поверхность такой объемной волны синусоидальна. Высота гребня волны (ее амплитуда) определяется реактивной мощностью (энергией) СЭС – Q , кВАр. Такому режиму полной мощности (энергии) СЭС соответствует диаграмма рис.2,а, где показаны ее составляющие.



а



б

Рис.2. Мощность (энергия) ЭЭС в режимах:
а – синусоидальный режим; б – несинусоидальный режим

При этом мгновенное значение полной мощности можно определить по известному выражению, кВА

$$S_{i\bar{a}i} = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (2)$$

где P – действующее (среднее за период синусоидального тока) значение активной мощности, как мощности продольной составляющей поляризованной диэлектрической среды СЭС, кВт; Q – амплитудное значение реактивной мощности СЭС.

Действующее значение этой мощности, очевидно, можно определить по выражению, кВА

$$S_{\bar{a}\bar{a}\bar{e}} = \sqrt{P^2 + \left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)^2}. \quad (3)$$

При несинусоидальном токе или (и) напряжении поверхность объемной волны энергии электромагнитного поля СЭС несинусоидальная. В этом случае режиму полной

мощности (энергии) СЭС соответствует диаграмма рис.2.б.

Как известно, в случае несинусоидальности тока или (и) напряжения в СЭС для анализа ее режимов применяется чисто математический метод гармонических составляющих, при котором несинусоидальные кривые тока или (и) напряжения заменяют набором синусоидальных кривых с определенной амплитудой, частотой и начальным углом. Поэтому можно говорить и о мощности (энергии) гармонических составляющих СЭС [5].

Отношение частоты гармонической составляющей к частоте 50 Гц называется номером гармоники. При этом мощность (энергию) гармоник с порядковым номером гармоники большим единицы называют мощностью (энергией) помех.

Учитывая, что причиной условного появления гармоник тока является нарушение синусоидальности поверхности объемной волны поляризованной диэлектрической среды СЭС, можно предположить, что мощность (энергия) помех имеет реактивный характер. При этом реактивную мощность можно представить состоящей из набора реактивных мощностей всех гармоник так, как показано на рис.3.

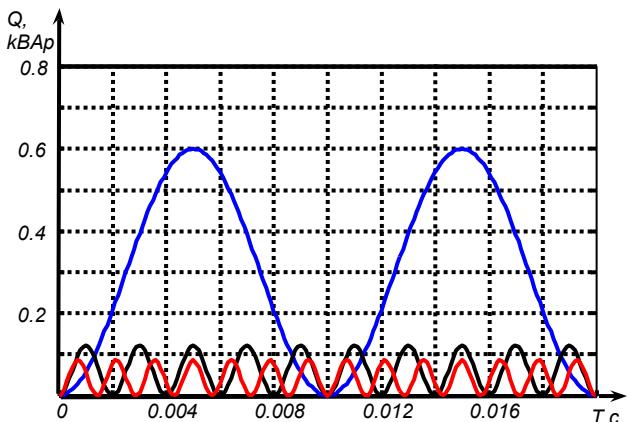


Рис.3. Реактивная мощность (энергия) СЭС общего назначения

В этом случае полная действующая мощность СЭС общего назначения определяется соотношением, кВА

$$S_{\bar{a}\bar{a}\bar{e}} = \sqrt{P^2 + \left(\frac{Q + T_{\Sigma}}{\sqrt{2}}\right)^2}, \quad (4)$$

где T_{Σ} – мощность помех (искажения) как

суммарное значение мощности всех гармоник, кВАр,

$$T_{\Sigma} = \sum_{i=2}^k Q_{Vi}; \quad (5)$$

Q_{Vi} – реактивная мощность помех i -й гармоники, кВАр

$$Q_{Vi} = U_{Vi} I_{Vi}; \quad (6)$$

U_{Vi} – действующее напряжение V -й гармоники на конденсаторе, В; V - номер гармоники, которая рассматривается, как отношение частоты этой гармоники к частоте первой гармоники (50 Гц); I_{Vi} - действующее значение тока V -й гармоники в конденсаторах, А; k - номер последний гармоники в спектре гармоник тока СЭС.

Следовательно, реактивную мощность (электроэнергию) помех СЭС общего назначения можно снизить с помощью обычных конденсаторных установок, которые применяются в СЭС для компенсации ее реактивных нагрузок, либо с помощью специальных фильтро-компенсирующих устройств (ФКУ), наиболее простыми из которых являются пассивные резонансные фильтры.

Как известно, пассивный фильтр это цепочка последовательно соединенных, специально подобранных индуктивности и емкости.

На частоте резонансной гармоники общее реактивное сопротивление фильтра близко к нулю и эта гармоника полностью “замыкается” в фильтре. Остальные гармоники “проникают” в фильтр частично. При этом конденсаторы ФКУ могут перегрузиться и выйти из строя.

С учетом этого, максимальная перегрузка конденсаторов по мощности может быть допущена не более чем, кВАр

$$Q_{iade} = \sqrt{2} Q_{i\bar{i}} = 1,41 Q_{i\bar{i}}, \quad (7)$$

где Q_{nom} – номинальная (паспортная) мощность конденсаторов, кВАр.

Кроме того, последовательное включение индуктивности и емкости приводит к повышению напряжения первой гармоники на емкости фильтра

$$K_U = \frac{V_p}{V_p^2 - 1}. \quad (8)$$

где V_p – номер резонансной гармоники.

Как известно из [2], максимальное допустимое напряжение на конденсаторах установлено на уровне $1,1U_{nom}$.

Из (8) можно видеть, что при этом номер резонансной гармоники в последовательной цепи “индуктивность – емкость”

$$V_p \geq \sqrt{11} = 3,3. \quad (9)$$

Поскольку согласно формуле (1), мощность конденсаторов зависит от их напряжения, максимально допустимый ток конденсаторов КУ

$$I_{iade} = \frac{1,41 Q_{i\bar{i}}}{\sqrt{3} \cdot 1,1 U_{i\bar{i}}} = 1,28 I_{i\bar{i}}. \quad (10)$$

В качестве примера рассмотрим СЭС общего назначения (рис.1), в которой расчетная активная нагрузка $P_p = 450$ кВт; расчетная реактивная нагрузка $Q_p = 300$ кВАр. Вентильный преобразователь создает на шинах 0,4 кВ цеховой ТП напряжения канонических высших гармоник U_{Vi} , приведены в таблице.

Для компенсации реактивной нагрузки в СЭС применяется конденсаторная установка, у которой $Q_{ky} = 190$ кВАр, $U_{i\bar{i}} = 0,4$ кВ.

Реактивное сопротивление конденсаторов на первой гармонике

$$X_{E\bar{O}1} = \frac{U_{i\bar{i}}^2}{Q_{E\bar{O}}} \cdot 10^{-3} = \frac{0,4^2}{0,19} = 0,84210, \text{ Ом.}$$

С учетом высших гармоник фазное напряжение ТП

$$U_{\delta} = \sqrt{\left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)^2 + \sum_{V=5}^{37} U_{Vi}^2} = 246,3 \text{ В.}$$

Реактивная мощность помех в конденсаторах определяется по выражению (6), а их фазная реактивная мощность первой гармоники – по выражению

$$Q_1 = \frac{U_{i\bar{i}}^2 \cdot 10^3}{X_{E\bar{O}1}} = \frac{0,23^2 \cdot 10^3}{0,84210} = 62,819 \text{ кВАр.}$$

Суммарная реактивная нагрузка, кВАр, каждой фазы конденсаторной установки в соответствии с выражением (5)

$$T_{\Sigma} = \sum_{i=5}^{37} Q_{Vi} = 72,958.$$

Пример расчета

<i>V</i>	<i>U_v</i> , В	<i>X_{KV}</i> , Ом	<i>I_{KV}</i> , А	<i>Q_{KV}</i> , кВАр
1	230,0	0,84210	273,1	62,819
5	87,6	0,16842	104,0	9,110
7	8,9	0,12030	74,3	0,616
11	3,6	0,07655	47,3	0,170
13	2,6	0,06478	40,0	0,104
17	1,5	0,04953	30,6	0,046
19	1,2	0,04432	27,4	0,033
23	0,8	0,03661	22,6	0,018
25	0,7	0,03368	20,8	0,015
29	0,5	0,02904	17,9	0,009
31	0,5	0,02716	16,8	0,008
35	0,4	0,02406	14,9	0,006
37	0,3	0,02276	14,0	0,004
Σ	246,3	-	313,7	72,958

Нагрузка конденсаторов в этом конкретном случае:

по напряжению

$$Q_U = \frac{\sqrt{\sum_{V=1}^{37} U_V^2}}{U_1} = \frac{246,3}{230,0} = 1,07 < 1,1,$$

по току

$$Q_I = \frac{\sqrt{\sum_{V=1}^{37} I_V^2}}{I_1} = \frac{313,7}{273,1} = 1,15 < 1,28,$$

по мощности

$$Q_Q = \frac{\sum_{V=1}^{37} Q_V}{Q_1} = \frac{72,958}{62,819} = 1,16 < 1,41.$$

Таким образом, в этом конкретном случае возможна безопасная работа конденсаторной установки в СЭС общего назначения.

Коэффициент искажения синусоидальности напряжения, %, согласно ГОСТ

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{V=5}^{37} U_V^2} \cdot 10^2}{U_1} = \frac{88,11}{230} \cdot 100 = 38,31 > 12.$$

Так как значение этого коэффициента более чем в три раза превышает предельно допустимое значение для сети с $U_{\text{ном}} = 0,4$ кВ, а коэффициент напряжения пятой гармоники, %,

$$K_{U(5)} = \frac{U_5 \cdot 10^2}{U_1} = \frac{87,6}{230} \cdot 100 = 38,1 >> 6,$$

то конденсаторную установку необходимо применять в составе фильтрокомпенсирующего устройства для ограничения в СЭС тока пятой гармоники.

Выводы

1. Несинусоидальность тока проводимости токоведущих частей СЭС общего назначения приводит к нарушению синусоидальности тока смещения их упругой диэлектрической среды, вследствие чего искажается синусоидальность боковой поверхности объемных импульсов энергии электромагнитного поля СЭС.

2. Искажение боковой поверхности указанных импульсов свидетельствует о том, что энергия помех физически представляет собой часть энергии поперечной поляризации упругой диэлектрической среды СЭС, то есть имеет реактивный колебательный характер.

3. Синусоиды гармонических составляющих реактивной энергии помех СЭС сдвинуты по фазе одна относительно другой, и можно суммировать только их средние величины (их действующие значения), а не эквивалентные амплитуды.

4. Максимальная нагрузка конденсаторов в СЭС общего назначения при условии равенства их номинального напряжения номинальному напряжению электрической сети составляет величину, которая определяется уравнением (7).

5. Режим работы конденсаторов в электрических сетях необходимо оценивать отдельно по напряжению, току и мощности с учетом коэффициента несинусоидальности напряжения, установленного ГОСТ.

Список использованной литературы

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники/ Л.А. Бессонов Изд. 6-е. Учеб. для студентов высш. энергетич. и электротехнич. вузов. – М.: Высш. шк., 1973. – 752 с.
2. Веников В.А. Теория подобия и моделирование применительно к задачам электроэнергетики/ В.А. Веников – М.: Высш. шк., 1966. – 487 с.
3. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Киев. ГОССТАНДАРТ УКРАИНЫ, 1999. – 31 с.
4. Дорошенко О.І. Що таке електрична енергія ?/ О.І. Дорошенко// Промелектро. – 2009. – № 3. – С. 10–15.
5. Дорошенко А.И., Динь Н.К. О физической сущности помех в системе электроснабжения потребителей/ О.І. Дорошенко, Н.К. Динь// Международная научно-техническая конференция “Университетская наука – 2009”. Сб. докладов в 2 т. – Т. 1–Мариуполь: ПГТУ. – 2009. – С. 323.
6. Зубюк Ю.П. Сучасні конденсатори в системах електропостачання/ Ю.П. Зубюк // Промелектро. – 2004. – № 6. – С. 53 – 55.
7. Кадомский Д.Е. Активная и реактивная мощность – характеристики средних значений работы и энергии периодического электромагнитного поля в элементах нелинейных цепей / Д.Е. Кадомский // Электричество. – 1987. – № 7. – С. 39 - 49.
8. Standard, ANSI/IEEE 18-2002. IEEE standard for shunt power capacitors. IEEE, New York. – 2002. – 17c.



Дорошенко
Александр Иванович,
канд. техн. наук, доц. каф.
эл.снабжения
Одес. национ. политехн. у-та
тел. 734-85-48
65111, Одесса,
ул. Ген. Бочарова, 4, кв. 78
тел. 56-25-93



Динь Нгок Куанг,
аспирант каф. эл.снабжения
Одес. национ. политехн.
ун-та
тел. 7-34-85-48



Иванова
Ольга Леонтиевна
студентка магистратуры
каф. эл.снабжения
Одес. национ. политехн.
ун-та
тел. 7-34-85-48

Получено 22.09.2009