

УДК 621.319.44

М.К. БОЧАРОВ<sup>1</sup>, Ю.П. ЗУБЮК<sup>2</sup> (канд.техн.наук)

<sup>1</sup> Украинский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования с опытно-экспериментальным производством

<sup>2</sup> ООО «Электросфера»  
ukrniive@ukrniive.com.ua

## ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ КОНДЕНСАТОРНЫХ УСТАНОВОК СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

*Цель статьи - представить результаты разработки и внедрения современных конденсаторных установок среднего напряжения для компенсации реактивной мощности. Представлено описание схемных решений, особенностей конструкции и алгоритмов регулирования, которые обеспечивают эффективное функционирование конденсаторных установок.*

**Реактивная мощность, компенсация, среднее напряжение, конденсаторная установка, алгоритм регулирования.**

В начале последнего десятилетия в Украине степень компенсации РМ в сетях Минтопэнего составляла приблизительно 0,09 кВАр/кВт, а с учетом компенсирующих устройств в сетях электропотребления – 0,42 кВАр/кВт, причем в отдельных регионах она не превышала 30% [1]. Таким образом, для приближения к уровню компенсации РМ в развитых странах существующий парк устройств компенсации РМ следовало бы удвоить. Эта задача особенно актуальна для Донецкого региона, в котором доля низкосинусных потребителей в сетях промышленных предприятий и энергообъектов наиболее велика.

В силу известных преимуществ, наиболее перспективным средством компенсации РМ являются косинусные конденсаторы и конденсаторные установки (КУ). КУ широко применяются в сетях и системах электроснабжения промпредприятий и энергообъектов практически всех уровней не только в виде индивидуальной, групповой и централизованной компенсации РМ, а также в симметрирующих, фильтрующих, комбинированных (симметро-компенсирующих, фильтро-симметрирующих и т.п.) устройствах, емкостных преобразователях параметров электромагнитной энергии и т.п. Известно [2], что примерно треть КУ применяются на среднем напряжении, причем удельное снижение потерь за счет ввода КУ в сетях напряжением 6-10 кВ оценивается в 150-300 кВт·час/кВАр в год. Состояние КУ среднего напряжения в Украине, можно охарактеризовать как весьма плачевное: в основном это КУ нерегулируемые, без надлежащих средств защиты (реакторов и проч.), большими потерями активной мощности (до 1,5-2 Вт/кВАр), часто с экологически вредными конденсаторами (с пропиткой трихлордифенилом), произведенными до середины 80-х гг., подлежащими незамедлительной замене и специальной утилизации. Очевидно, что задача внедрения современных высокоэффективных КУ становится все более актуальной.

Существенной особенностью современного состояния систем электропотребления является существенное увеличение долей нелинейных и несимметричных потребителей в общем электропотреблении. Увеличение доли несимметричных нагрузок, увеличение единичной мощности современных несимметричных электротехнологических установок, в большом количестве случаев, происходит без симметрирования токов, что приводит к соответствующему увеличению несимметрии напряжений.

В настоящее время, в силу известных технических и экономических преимуществ, КУ в основном выполняются со ступенчатой коммутацией секций конденсаторов. Выбор средств компенсации должен производиться для режима наибольших реактивных нагрузок. В случае, когда все выбранные, с учетом этого требования, КУ будут постоянно, независимо от режима реактивных нагрузок, подключены к сети, то в периоды понижения нагрузок вырабатываемая избыточная РМ будет передаваться от потребителя в энергосистему. При этом увеличатся токовая нагрузка и потери мощности в сети, а напряжение в такой сети может достигнуть недопустимых значений. Для предотвращения этих явлений, необходимо применять КУ с устройствами регулирования их реактивной мощности. Регулирование мощности КУ может производиться вручную или автоматически. Ручное регулирование не является достаточно надежным способом регулирования, так как оно существенно зависит от различных субъективных факторов, и может быть приемлемым на предприятиях, где осуществляется диспетчерское управление режимами работы электроэнергетического оборудования.

Автоматическое регулирование мощности конденсаторных установок может осуществляться, в основном, по следующим параметрам: времени суток, напряжению, току нагрузки, коэффициенту мощности, значению и направлению реактивной мощности. Выбор параметра регулирования определяется конкретными условиями - характером графиков активной и реактивной нагрузок, характеристиками сети, режимом напряжения в сети и т. п. В традиционных регуляторах коэффициента мощности, в подавляющем числе случаев, в основе алгоритма лежит регулирование по величине и знаку РМ, которая определяется по току одной из фаз и линейному напряжению между двумя другими фазами трехфазной сети. В случае несимметрии

напряжений/токов, подключение трансформатора тока, как правило, делается в фазе с минимальным током, для исключения режима перекомпенсации. Очевидно, что в этом случае возникает соответствующая недокомпенсация в других фазах, а в случаях включения трансформатора тока в другие фазы может возникнуть перекомпенсация РМ, по меньшей мере в одной их фаз. Для компенсации РМ при существенно несимметричных режимах следует применять несимметричные КУ, состоящие из групп однофазных конденсаторов разной емкости, которые регулируются по специальным алгоритмам. При этом такие регуляторы должны содержать, по меньшей мере, два парных канала измерения соответствующих токов и напряжений.

В случае существенной несинусоидальности напряжений в точке подключения КУ применяются регуляторы, имеющие возможность предотвратить недопустимую перегрузку конденсаторов по току

$$\sqrt{I_1^2 + \sum_2^n I_v^2} \leq k_{\Gamma} I_{н.ом}, \text{ где } I_1 \text{ и } I_n - \text{токи первой и } v\text{-й гармонической составляющей (из } n$$

учитываемых);  $I_{н.ом}$  - номинальный ток КУ.  $k_{\Gamma}$  - коэффициент допустимой перегрузки конденсаторов (обычно равен 1,3, однако производители конденсаторов могут предлагать другие значения).

Например, регуляторы типа ВК06/12 (Германия) имеет дополнительный токовый вход, позволяющий контролировать собственный ток КУ.

Другие типы регуляторов, например NOVAR 1206/1214 (Чехия), позволяют контролировать перегрузку КУ по току косвенным способом (без дополнительного токового входа), путем вычисления т.н. коэффициента нагрузки конденсатора высшими гармониками (*capacitor harmonic load-CHL*)

$$CHL = \sqrt{\sum_2^n \left(\frac{vU_v}{U_{н.ом}}\right)^2} * 100, \% , \text{ где } U_{н.ом}, U_v - \text{напряжения номинальное и } v\text{-й гармонической}$$

составляющей.

Следует отметить, что поскольку в настоящее время не существует общепринятого определения понятия «РМ при несинусоидальных режимах» и существует значительное количество приемлемых, но альтернативных алгоритмов ее вычисления, необходимо соответствующим образом относиться к традиционным алгоритмам регуляторов и применять альтернативные алгоритмы и способы корректировки. Примером альтернативного алгоритма регулирования емкости КУ может служить алгоритм обеспечения минимальных потерь  $\Delta P$  посредством использования поперечной КУ с оптимальной емкостью  $C_{ОПТ}$ , для выполнения условия  $\partial \Delta P / \partial C = 0$ .

Современные регуляторы выполняются микропроцессорными, четырехквadrантными и, в основном, отличаются организацией порядка включения ступеней КУ, обеспечиваемыми точностями, функциями защиты, быстродействием, элементной базой и конструктивными особенностями. Чувствительность современных регуляторов достигает 2 мА.

Современный уровень конденсаторостроения позволяет применять косинусные однофазные конденсаторы промышленной частоты с единичной мощностью достигающей 1 МВАр и номинальным напряжением, достигающим 24 кВ, при сохранении тенденций к повышению этих величин. В КУ напряжением 35 кВ традиционной является схема включения однофазных конденсаторов в звезду, причем номинальное напряжение конденсаторов до 24 кВ позволяет повысить надежность установок за счет отсутствия последовательно включенных конденсаторов в ветвях звезды. Схемы с включением конденсаторов в звезду также применяются в установках с плавным регулированием реактивной мощности (содержащих реакторы с тиристорным управлением) и фильтрокомпенсирующих устройствах, содержащих одну или нескольких цепей с последовательным соединением конденсаторов и фильтровых реакторов, настроенных на определенные частоты высших гармонических составляющих. Такие установки позволяют одновременно осуществлять компенсацию РМ, частичное подавление присутствующих в компенсируемой сети гармоник, искажающих синусоидальность напряжения и другие функции. Однофазные КУ с регулируемым декомпенсирующим дросселем применяются на напряжении 27 кВ (для железных дорог). Конденсаторы КУ продольной компенсации могут изготавливаться с повышенными перегрузочными способностями.

Трехфазные косинусные и фильтрующие конденсаторы выпускаются обычно до напряжения 15 кВ. В автоматических КУ с номинальным напряжением 6-15 кВ, чаще всего, используют ступенчатое включение трехфазных конденсаторов, хотя в ряде случаев более эффективным является включение однофазных конденсаторов в звезду. Здесь следует отметить, что по нашим данным, для одной и той же суммарной мощности, стоимость трехфазного конденсатора по сравнению со стоимостью трех однофазных, для напряжения 6-12 кВ меньше приблизительно на 15-130%, а для напряжений 0,4-0,69 кВ – на 25-175% (разница тем меньше, чем больше единичная мощность трехфазного конденсатора).

Коммутация ступеней КУ среднего напряжения, как правило, производится вакуумными контакторами. Для напряжений 35 кВ также применяются элегазовые выключатели. Для снижения бросков тока при коммутациях применяются пусковые (демпфирующие) реакторы, серийно выпускаемые с индуктивностями 0,05-0,1 мГн для номинальных токов конденсаторов 50-200 А.

Во все увеличивающемся количестве случаев применения КУ в условиях ухудшенных, относительно регламентируемых ГОСТ 13109-97, показателей качества электроэнергии обычно применяются:

- конденсаторы с нестандартными номинальными напряжениями (например 6,6 и 11 кВ вместо 6,3 и 10,5 кВ) для работы в условиях положительных (превышающих номинальное) отклонений напряжения;

- антирезонансные («детюнинговые») дроссели, чаще всего с коэффициентами расстройки 7 и 14% (соответствующих резонансным частотам контура «конденсатор-дроссель» 189 и 134 Гц), для снижения перегрузки конденсаторов токами высших гармонических составляющих;

- регуляторы и другие устройства защиты, контролируемые соответствующие перегрузки конденсаторов по току и напряжению, ограничители перенапряжений и т.п.

В случае существенной несинусоидальности напряжения дополнительно применяются настроенные фильтрующие устройства.

В системах защиты современных КУ, работающих в условиях отклонений и несинусоидальности напряжения, применяются устройства (блоки) контролируемые: избыточное давление внутри корпуса конденсатора, в виде соответствующего датчика, устанавливаемого в корпусе конденсатора; состояние внешних предохранителей для избежания несимметричных режимов, например с помощью применения специальных держателей с индикацией и сигнализацией срабатывания; коэффициенты несинусоидальности (искажения синусоидальности кривой) напряжения (THDU) и тока (THDI), в том числе и перегрузки по отдельным гармоническим составляющим; величину собственного тока КУ и входного напряжения для устройств, отключающих КУ в случае превышения максимально допустимых значений напряжения и тока конденсаторов; напряжение на катушках вакуумных контакторов для защиты от опасного режима неустойчивого контакта («дребезга контакта») при пониженном напряжении; температуру конденсаторов и/или внутреннего пространства КУ; ток небаланса при использовании схемы с включением однофазных конденсаторов более чем в одну звезду (для срабатывания защиты от появления асимметрии емкости в ветвях КУ);- величину расширения корпуса конденсатора .

Для регистрации не нормальных режимов работы КУ и их защиты необходимо применять универсальные (многофункциональные) устройства, одновременно осуществляющие все перечисленные функции контроля, например прибор EPS 64 (Чехия).

Следует отметить, что нынешние условия несовершенства нормативных документов, тарифной политики, ценообразования на электрооборудование, неопределенности налоговой «категории» реактивной мощности (несоответствие ее понятию «товар») и тот факт, что рост цен на комплектующие изделия для КУ существенно превышает темпы роста тарифа на электроэнергию, существенно усложняет решение задач КРМ. Увеличение темпов внедрения искажающих нагрузок, которые в нашей стране в огромном числе случаев подключаются к сети без средств электромагнитной совместимости, приводит к увеличивающемуся искажению напряжения на все более высоких уровнях соответствующих систем. Поэтому задача компенсации РМ в сетях и системах электропотребления Украины становится все более наукоемкой. Разработка системных подходов, в том числе за счет применения новых алгоритмов регулирования КУ, современных методов оптимизации их размещения в электрических системах, например на основе генетических алгоритмов решения оптимизационных задач, сочетания затратных и технических критериев оптимизации, анализа электромагнитной совместимости и взаимовлияния КУ и других элементов электрических систем, применения современной элементной базы, позволяют существенно повысить общую эффективность систем компенсации РМ в целом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Паливно-енергетичний комплекс України на порозі третього тисячоліття. – К.: Українські енциклопедичні знання, 2001. – 400 с.

2. Железко Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях / Ю.С. Железко. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 176 с.

Надійшла до редколегії 30.03.2011

Рецензент: Ю.Л. Сасенко

М.К. БОЧАРОВ<sup>1</sup>, Ю.П. ЗУБЮК<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Український науково-дослідний, проектно-конструкторський і технологічний інститут вибухозахисного і рудникового електрообладнання з дослідно-експериментальним виробництвом

2 ТОВ «Електросфера»

**Особливості розробки та впровадження сучасних конденсаторних установок середньої напруги.** Мета статті - представити результати розробки та впровадження сучасних конденсаторних установок середньої напруги для компенсації реактивної потужності. Представлено опис схемних рішень, особливостей конструкції та алгоритмів регулювання, що забезпечують ефективне функціонування конденсаторних установок. **Реактивна потужність, компенсація, середня напруга, конденсаторна установка, алгоритм регулювання.**

M. BOCHAROV<sup>1</sup>, Y. ZUBYUK<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ukrainian Scientific-Research Designing and Technological Institute of Explosion-Proof and Mining Electrical Equipment with Experimental Production 2 Ltd «Electrosphera»

**Special Features of the Elaboration and Implementation of Medium Voltage Capacitor Banks.** The object of article is to present the results of elaboration of modern medium voltage capacitor banks for reactive power compensation. The description of scheme decisions, special features of constructions and control algorithms which provide capacitor banks effective functioning are represented.

**Reactive power, compensation, middle voltage, capacitor bank, control algorithm.**