

ВЫБОР КОММУТАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

М.С. Балабанов

Наиболее противоречивым и теоретически сложным, в плане расчета, является вопрос выбора коммутационной аппаратуры для устройств компенсации реактивной мощности (УКРМ). В статье приведены результаты анализа линейки коммутационных аппаратов класса С2, выпускаемых мировой промышленностью по состоянию на 2013г, пригодных для эксплуатации в составе УКРМ. Приведены выдержки из НД РФ, отражающие требования к выключателю УКРМ. Описаны проблемы выбора коммутационных аппаратов на основании опыта реализованных проектов ООО «Международная Энергосберегающая Корпорация», г. Санкт-Петербург.

Ключевые слова: коммутационный аппарат, устройство компенсации реактивной мощности (УКРМ), емкостной ток.

Одним из важных мероприятий в ходе выполнения НИОКР по внедрению УКРМ является выбор характеристик коммутационного аппарата. В настоящей статье приводится анализ реализации проектов УКРМ напряжением от 0,4 до 220 кВ суммарной мощностью свыше 830 МВАр, выполненных под руководством и при непосредственном участии автора.

В подавляющем большинстве исполнений УКРМ основным элементом является конденсаторная батарея. Переходные процессы при коммутации батарей сходны с процессами при коммутации воздушных и кабельных линий. Однако имеются существенные отличия, обуславливающие более тяжелые условия работы коммутационной аппаратуры батарей:

а) значительно большая емкость и незначительная собственная индуктивность батарей, что создает низкое входное сопротивление и высокие собственные частоты цепи. Это приводит к значительно большим броскам тока при включении и повторным зажиганиям при отключении батареи по сравнению с соответствующими коммутациями линий и кабелей, а также сильно увеличивает динамические воздействия на аппаратуру;

б) возможность значительно больших амплитуд восстанавливающихся напряжений при отключении батареи за счет смещения нейтралей, а тем самым и большая вероятность опасных повторных пробоев;

в) значительно меньшие активные сопротивления цепи и отсутствие потерь на корону, что способствует большим перенапряжениям.

По этим причинам, например, выключатель, успешно отключающий линию или кабель, может оказаться непригодным для отключения конденсаторной батареи того же напряжения.

Включение батареи конденсаторов сопровождается относительно большими толчками тока, так как в момент замыкания цепи незаряженная емкость батареи для системы является коротким замыканием и ток включения практически ограничивается только сопротивлением сети, к которой подключается батарея. Ток включения отдельной незаряженной батареи может быть в 5–15 раз больше ее номинального тока. Если батарея перед включением имела заряд с напряжением, равным по величине и противоположным по знаку напряжению сети, толчок тока получается примерно в 2 раза больше указанного, т. е. в 10–30 раз больше номинального тока батареи. Если вблизи от включаемой батареи имеется другая, включенная ранее батарея, ток включения резко возрастает и может превышать номинальный в 20–250 раз. Такие толчки тока могут вызвать перегорание предохранителей, защищающих конденсаторы, ложное срабатывание релейных защит батареи, вызвать повреждение и быстрое изнашивание контактов выключателей и др.

Включение батарей сопровождается перенапряжениями порядка 2,0–2,7 U_{ϕ} . Еще большие толчки тока и перенапряжения могут возникать в переходных процессах при повторных зажиганиях в выключателе, отключающем батарею, чему способствует постоянный заряд, остающийся на батарее после ее отключения.

ВЫБОР КОММУТАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Выдача разрешений на допуск в эксплуатацию энергоустановок регламентируется Приказом N212 [16], согласно которого инспектором Ростехнадзора проверяется соответствие проектных решений, ТХ комплектующих (указанных на шильде оборудования) и протоколов заводских испытаний (в том числе паспортов). На территории РФ и стран СНГ, почти в 100% случаев проверок, обнаруживается несоответствие выключателей классу С2 для коммутации конденсаторных батарей, согласно ГОСТ Р52565-2006 [5].

Формулирование требований к коммутационному аппарату УКРМ:

1. Рабочая среда выключателя: вакуум, элегаз.
2. Соответствие выключателя классу С2.
3. Способность выключателя коммутировать емкостной ток необходимой величины, не менее 130% номинального тока батареи.

Рекомендации НД РФ по выбору выключателя для УКРМ

СТО 56947007-29.240.10.028-2009 [14], п.4.12-14 рекомендует в ОРУ 110-750 кВ, в том числе в цепях шунтирующих реакторов и батарей статических конденсаторов, применять элегазовые выключатели. В ОРУ 35 кВ должны предусматриваться элегазовые или вакуумные выключатели. В РУ 6, 10 кВ должны предусматриваться шкафы КРУ с вакуумными или элегазовыми выключателями.

ПУЭ-7 [8] п. 5.6.15. гласит: «Аппараты и токоведущие части в цепи конденсаторной батареи должны допускать длительное прохождение тока, составляющего 130% номинального тока батареи».

СТО 56947007-29.130.10.095-2011 [10] п.8.1-4 устанавливает следующие требова-

ния. Для коммутации конденсаторных батарей могут применяться выключатели, возможность использования которых в этом режиме указана в технических условиях или другой технической документации предприятия-изготовителя. Ток конденсаторной батареи должен быть не более нормированного предприятием-изготовителем для устанавливаемого выключателя. Выключатель должен быть испытан в соответствии требованиями ГОСТ Р 52565 раздел 9.7 «Испытание на коммутационную способность при емкостных токах». Применение выключателей при токе, превышающем значение тока, при котором проводились испытания на отключение конденсаторной батареи, допускается при представлении предприятием-изготовителем соответствующего обоснования. Рекомендуется применение выключателей с очень низкой вероятностью повторных пробоев (класс С2) при отключении емкостных токов. Класс выключателя С2 должен быть документально подтвержден предприятием-изготовителем.

Обоснование рабочей среды выключателя. Несмотря на допустимость СТО применения для УКРМ 6, 10, 35 кВ элегазовых выключателей исследователи Евдокунин и Тилер [15] (как и прочие [13]) настоятельно рекомендуют применять вакуумную технику. Применение элегазовых выключателей также ограничивают требования безопасности [6, 7, 19].

Автором был проведен анализ линейки выключателей всех мировых производителей на соответствие классу С2 (результаты представлены в таблице).

Класс напряжения, кВ	Тип рабочего тела выключателя	Мировой производитель	Номинальный ток выключателя, А	Емкостной ток выключателя по С2, А	Максимальная расчетная мощность УКРМ, кВАр
6	Вакуум	ABB	1 600	1 040 ^[19]	8 314
6	Вакуум	Siemens	1250	400 ^[18]	3 198
10	Вакуум	ABB	1 600	1 040 ^[19]	13 885
10	Вакуум	Siemens	3 150	400 ^[17]	6 394
35	Элегаз	ABB	4 000	-	30 000*
110	Элегаз	ABB	5 000	-	30 000*
220	Элегаз	ABB	5 000	-	30 000*

Примечание: *Согласно ПУЭ п.5.6.37 максимально допустимая мощность группы КБ 30 МВАр, в соответствии с требованиями противопожарной безопасности.

Исследования показали, что ни один выключатель, из всей линейки коммутационной техники, предлагаемой российскими производителями (НПК «Таврида Электрик»; ЗАО «ГК «Электроцит»-ТМ Самара»; ЗАО «ЗАВОД «ИНТЕГРАЛ»), не подвергался испытаниям на отключение емкостных токов, согласно пунктам декларации соответствия ГОСТ 52565. Соответственно, их применение для УКРМ противоречит требованиям НД РФ.

Из всех прочих производителей гарантируют соответствие выключателей классу С2 три компании: "Schneider Electric", "ABB", "Siemens", из них "Schneider Electric" выпускает элегазовые выключатели классов 6, 10 кВ и их можно рассматривать только в качестве альтернативы вакуумным.

Следует отметить, что по состоянию на 2013 год единственным мировым центром по испытаниям коммутационного оборудования для УКРМ является компания DNV KEMA, г. Арнем, Голландия (Arnhem, the Netherlands, <http://www.dnvkema.com/Default.aspx>). Все мировые новинки коммутационной техники испытываются исключительно в высоковольтных лабораториях данного научно-исследовательского центра.

Расчет тока выключателя УКРМ

Для выбора аппаратуры в цепях присоединения конденсаторных батарей (КБ) необходимо знать максимальную величину тока, возникающего в момент коммутации. Известно, что включение КБ под напряжение сопровождается большим броском переходного тока, который быстро затухает, поэтому максимальным является его начальное значение непосредственно после коммутации (при $t=+0$). Этот режим полностью определяется двумя законами коммутации:

- ток в индуктивности и напряжение на емкости не могут изменяться скачком;
- напряжение на индуктивности и ток через емкость могут изменяться скачком.

Для описания всего переходного процесса (например, для оценки перенапряжений) обычно требуется решение линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами для данной схемы коммутации с обязательным учетом активного сопротивления, т.к. при пренебрежении им будет иметь место не переходный, а установившийся разночастотный процесс. В отличие от этого при определении начальных величин переходного процесса (при $t=+0$) активное сопротивление допустимо не учитывать.

При включении конденсаторной батареи на сеть или работающую батарею начальная стадия переходного процесса представляет собой заряд подключаемой батареи либо от сети, либо от заряженной батареи (или от обеих вместе). При пренебрежении активными сопротивлениями в цепи, содержащей емкость и индуктивность, наибольший ток имеет место не в начальный момент включения, которое происходит при максимальном напряжении в сети и нулевом напряжении на подключаемой батарее, а в момент времени, соответствующий четверти периода промышленной частоты.

На практике, с учетом активного сопротивления схемы высокочастотная составляющая тока включения затухает значительно раньше этого момента и максимальный ток включения имеет место именно в начальный момент, когда подключаемая незаряженная КБ создает режим короткого замыкания (напряжение на ней не может измениться мгновенно). Поэтому в соответствии с теоретическими основами электротехники ток в первый момент после коммутации (при $t=+0$) равен [1, 2]:

$$I = \frac{U}{Z_B} = \frac{U}{\sqrt{L/C}}, \text{ А} \quad (1)$$

где:

- U – фазное напряжение сети, В;
- Z_B – характеристическое сопротивление сети, Ом;
- L – общая эквивалентная индуктивность рассматриваемой сети, Гн;
- C – общая эквивалентная емкость сети, Ф.

В выражении (1) и в дальнейшем напряжения и токи могут приниматься как в амплитудах так и действующих значениях.

Для случая включения незаряженной КБ на сеть выражение (1) может быть записано также в виде:

$$I = U \sqrt{\frac{C}{L}} = I_N \sqrt{\frac{W_{K3}}{Q_6}} = \sqrt{I_N \cdot I_{K3}}, \text{ кА} \quad (2)$$

где:

- I_N, Q_6 – номинальные значения тока и мощности конденсаторной батареи, кА или МВА;
- I_{K3}, W_{K3} – ток и мощность короткого замыкания в точке подключения батареи, кА или МВА.

Выражение (1) является не приближенным, как это считает ряд авторов [3, 4], а точным для рассматриваемых начальных условий, т.к. представляет собой значение огибающей амплитуды колебательного переход-

ВЫБОР КОММУТАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

ного процесса в момент непосредственно после коммутации (при $t=0$).

В то же время расчеты переходных режимов, в том числе и их начальных значений, даже для схем сравнительно простой конфигурации, путем решения системы дифференциальных уравнений являются весьма трудоемкими и под силу разве что вычислительным машинам [2].

Поэтому все аналитические выражения для максимального тока при коммутации конденсаторных батарей, полученные за счет упрощений и допущений в точных описаниях всего переходного процесса путем решения линейных дифференциальных уравнений (в том числе и операторным методом), являются заведомо приближенными, что увеличивает вероятность ошибки.

Так, в книге «Мощные конденсаторные батареи» [3] и в других публикациях, где дается решение переходных процессов путем решения дифференциальных уравнений операторным методом для максимального тока включения батареи на сеть получено выражение, отличное от (2):

$$I = I_H \left(1 + \sqrt{\frac{W_{K3}}{Q_6}} \right) = I_H + \sqrt{I_H \cdot I_{K3}}, \text{ кА} \quad (3)$$

На самом деле выражение (3) является ошибочным.

Анализ показал, что (3) определяет не максимальный ток в момент включения, а максимальный ток в момент, соответствующий четверти периода промышленной частоты, как результат наложения на нее незатухающих высокочастотных колебаний. С математической точки зрения (3) получено при упрощении дифференциальных уравнений и приведении их к моменту $t=0$ в результате некорректного выноса за скобки очень малой величины отношения промышленной частоты к квадрату высокой частоты.

Практическое значение этой ошибки невелико, т.к. ток включения всегда много больше номинального тока КБ (емкостное сопротивление КБ всегда много больше индуктивного сопротивления сети), однако она имеет то принципиальное значение, что дала основание авторам (А.М. Берковский и Ю.М. Лысков «Мощные конденсаторные батареи» [3] и другим авторам) считать выражение (1) приближенным и считать его неприемлемым, например, для случаев, когда КБ подключены к разным обмоткам трансформаторов или они разделены друг от друга значительными индуктивностями.

Поскольку ток КЗ в сети всегда много больше номинального тока КБ, ток включения может в десятки и даже сотни раз превосходить его (особенно при включении КБ на ранее заряженную КБ) и в некоторых случаях целесообразно его ограничение до некоторой допустимой величины путем установки в цепях КБ токоограничивающих сопротивлений (как правило, в виде реакторов с требуемой индуктивностью).

Эта индуктивность для случая включения КБ на сеть определяется как:

$$L = L_c \cdot \left(\frac{I}{I_d} - 1 \right), \text{ Гн} \quad (4)$$

где L_c – индуктивность питающей сети, Гн;

I – максимальный ток включения КБ, кА;

I_d – допустимый ток включения КБ, кА.

Величина допустимого тока включения КБ определяется, в основном, из следующих соображений:

1. Он не должен быть больше величины, допускаемой ГОСТ и другой НТД (или указаниям заводов-изготовителей) на примененные конденсаторы.

2. Он не должен превышать величины, допускаемой данным коммутирующим аппаратом (выключателем любого типа, вакуумным контактором и т.п.) по отключающей способности с учетом процессов дугогашения, происходящих при коммутации КБ (пробой, повторные зажигания и т.д.) и по динамической устойчивости.

3. Он должен быть отстроен по величине или времени от уставки срабатывания защитных аппаратов (релейных защит или предохранителей) с коэффициентом запаса согласно требованиям ПУЭ, п.5.6.15 [8].

Из законов коммутации следует, что если в цепи КБ устанавливается токоограничивающий реактор с требуемой индуктивностью, то его конструкция должна быть рассчитана на полное фазное напряжение сети, так как в момент включения КБ, равносильного короткому замыканию в точке ее подключения, все фазное напряжение ложится на реакторе. Это обстоятельство, равно как и токоограничивающий эффект реактора, не зависят от того, включен он до КБ или в ее нейтрали, однако в последнем случае для сети 110 кВ с заземленной нейтралью изоляция реактора от земли может быть уменьшена.

В типовых КБ напряжением 6-110 кВ, составленных из единичных конденсаторов меньшего напряжения путем их параллельно-

последовательного соединения, в качестве токоограничивающих реакторов обычно используются реакторы-заградители высокочастотной связи, имеющие индуктивность порядка миллигенри, соизмеримую с индуктивностями сети при напряжениях 6-10 кВ. Их применение для снижения тока включения КБ на сеть напряжением 35 и 110 кВ неэффективно, т.к. индуктивность этих сетей существенно выше индуктивности таких реакторов. Однако, их применение для снижения токов включения КБ на КБ весьма целесообразно, ибо их индуктивность значительно выше индуктивности ошиновки между КБ.

В большинстве публикаций по рассматриваемому вопросу приводятся решения для двух наиболее простых случаев: включение КБ на сеть и включение КБ на ранее заряженную КБ без учета сети, что объясняется, по видимому, чисто математическими трудностями при определении начальных условий в описании разночастотных процессов при более сложных схемах. В общем же случае в схеме участвуют как сеть, так и ранее заряженные КБ и при предлагаемом в настоящей статье подходе определение начального тока не вызывает трудностей.

Из теоретических основ электротехники [2] следует, что эквивалентная индуктивность любой схемы определяется из опыта (расчета) короткого замыкания (КЗ), а эквивалентная емкость – из опыта (расчета) холостого хода, отнесенных к точке коммутации.

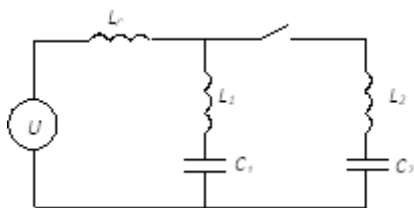


Рисунок 1 – Схема коммутации параллельных батарей в однофазной схеме

Схема коммутации параллельных батарей в однофазной схеме показана на рисунке 1 и определение ее эквивалентных индуктивности и емкости может быть выполнено, если учесть, что при отсутствии активных сопротивлений эквивалентная индуктивность определяет собой величину тока КЗ в месте включения незаряженной КБ, а эквивалентная емкость – номинальный ток обеих КБ, включенных последовательно в схеме.

$$L = L_2 + \frac{L_1 \cdot L_C}{L_1 + L_C}, \quad (5)$$

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}, \quad (6)$$

Из (5) и (6) видно, что в случае включения КБ емкостью C_2 и реактивностью L_2 на предварительно заряженную КБ с емкостью C_1 без реактора ($L_1=0$) имеет место заряд батареи от батареи через L_2 без участия системы, т.к. напряжение на C_1 измениться мгновенно не может и система оказывается зашунтированной. При $L_1 \neq 0$ и $L_2=0$ включаемая батарея заряжается от ранее заряженной КБ через L_1 и от системы через L_C , причем степень их участия в заряде зависит от соотношения L_1 и L_C .

При первоначальном включении КБ на сеть (например, КБ с емкостью C_2) происходит заряд емкости только от сети ($L=L_C$, $C=C_2$) и ток включения равен $I = U / \sqrt{L_C / C_2}$;

Поэтому ток включения батареи на батарею оказывается больше тока ее включения на сеть (например, для случая $C_1=C_2=C$) тогда, когда L_2 в два раза меньше L_C . Если считать, что при отсутствии реакторов заряд КБ от КБ происходит через индуктивность ошиновки между батареями ($L_{ш}$), которая значительно меньше индуктивности сети, оказывается, что ток в этом случае больше тока включения КБ на сеть в $\sqrt{L_C / L_{ш}}$ раз и именно на него должны рассчитываться коммутирующие и защитные аппараты. И, наоборот, если КБ имеют свои токоограничивающие реакторы, индуктивность которых равна или больше индуктивности сети, определяющим является включение КБ на сеть.

В случае, если на заряженную КБ включается другая КБ, заряженная до какого-то напряжения обратного знака, методика расчетов токов не меняется, но действующая ЭДС становится суммой двух напряжений. При коммутации отключения КБ и при повторных пробоях изолирующего промежутка коммутирующего аппарата происходит повторное включение, ток которого рассчитывается по (1), но с учетом величины и знака заряда отключаемой КБ.

Предварительно заряженных батарей может быть несколько и, если они одинаковы по емкости и имеют одинаковые реакторы, что имеет место, например, в случаях ступенчато-регулируемых КБ, их эквивалентная емкость увеличивается, а индуктивность уменьшается в число раз, равное числу КБ.

ВЫБОР КОММУТАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Если предварительно заряженные КБ отличаются по емкостям и индуктивностям реакторов, как это имеет место, например, в случае фильтровых КБ, то в эквивалентной емкости они учитываются как сумма емкостей всех КБ, а в эквивалентной индуктивности – как результат параллельного сложения индуктивностей всех реакторов.

По-прежнему, это объясняется тем, что напряжения на емкостях всех КБ мгновенно измениться не могут и их выводы эквипотенциальны.

В случае ступенчато-регулируемой КБ, в которой общая емкость равна $N + 1$ емкостей индивидуальных КБ, каждая из которых коммутируется отдельным аппаратом и имеет свой реактор, эквивалентные параметры имеют вид:

$$L = L_p + \frac{(L_p/N) \cdot L_c}{L_p/N + L_c} = \frac{L_p \cdot L_c}{L_p + N \cdot L_c} + L_p, \quad (7)$$

$$C = \frac{N \cdot C_{KB}}{N \cdot C_{KB} + 1} = \frac{N \cdot C_{KB}}{N + 1}, \quad (8)$$

где:

L_p – индуктивность реактора каждой КБ,

Гн;

L_c – индуктивность питающей сети, Гн;

N – число предварительно включенных

КБ;

C_{KB} – емкость каждой КБ, Ф.

В этом случае ток включения каждой очередной КБ:

$$\begin{aligned} I_{N+1} &= \frac{U}{\sqrt{\frac{L}{C}}} = \frac{U}{\sqrt{\frac{L_c \cdot L_p}{L_p + N \cdot L_c} + L_p} \cdot \sqrt{\frac{N \cdot C_{KB}}{N + 1}}} = \\ &= \frac{U}{\sqrt{L_p \cdot \left(\frac{L_c}{L_p + N \cdot L_c} + 1 \right) \cdot \frac{N \cdot C_{KB}}{N + 1}}} = \\ &= I_{KB} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{L_c}{L_p + N \cdot L_c} + 1 \right) \cdot \frac{N \cdot C_{KB}}{N + 1}}} = \\ &= I_{KB} \cdot \frac{\sqrt{N+1}}{\sqrt{\left(\frac{L_p + L_c \cdot (N+1)}{L_p + N L_c} \right)}}, \quad (9) \end{aligned}$$

где:

I_{KB} – ток включения одной КБ от сети, кА;
Из (9) видно, что, например, при $L_c = L_p$,

$$I_{N+1} = I_{KB} \cdot \sqrt{\frac{N}{N+2}}; \text{ и, следовательно, в этом}$$

случае ток включения КБ на другие заряженные КБ всегда меньше тока ее включения на сеть.

Согласно авторам [11] при подаче напряжения на батарею возникает ток включения, зависящий от емкости батареи и сопротивления сети. Ориентировочно ток включения батареи определяется по формуле (10):

$$I_{\text{вкл.УКРМ}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{ном.бск}} \cdot \left(K_{\text{И}} + \sqrt{\frac{W_{\text{КЗ}}}{Q_{\text{н.бск}}}} \right), \quad \text{кА} \quad (10)$$

где:

$I_{\text{вкл.бск}}$ – амплитудное значение тока включения БСК, кА;

$I_{\text{ном. бск}}$ – номинальный ток БСК, кА;

$W_{\text{КЗ}}$ – мощность КЗ на шинах, в месте установки БСК, кВАр;

$Q_{\text{н.бск}}$ – номинальная мощность БСК, кВАр;

$K_{\text{И}}$ – коэффициент загрузки конденсаторов по напряжению, определяемый как:

$$K_{\text{И}} = \frac{U_{\text{расч}}}{\sqrt{2} \cdot n \cdot U_{\text{н.к}}}, \quad (11)$$

где:

$U_{\text{расч}}$ – расчетное напряжение конденсаторной батареи, В,

n – количество рядов,

$U_{\text{н.к.}}$ – номинальное напряжение конденсатора, В.

При наличии двух батарей, каждая из которых со своим выключателем, могут возникнуть большие токи, чем в первом случае. Расчетным режимом является режим, когда одна батарея уже включена и включается другая. В этом случае ток определяется по формуле (12):

$$I_{\text{вкл}} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_p \cdot C_1}{\sqrt{3} \cdot X_0 \cdot (C_0 + C_1)} \cdot \sqrt{\frac{1}{314^2 \cdot (L_0 + L_p) \cdot C}}, \quad (12)$$

$$C = \frac{C_0 \cdot C_1}{C_0 + C_1}, \quad (13)$$

где:

U_p – расчетное напряжение батареи, В;

X_0 – расчетное сопротивление ранее включенной батареи, Ом;

C_0 – емкость ранее включенной батареи,

Ф;

C_1 – емкость включаемой батареи, Ф;

L_0 – индуктивность ошиновки между включаемыми батареями, Гн (удельную индуктивность ошиновки можно принять равной 1.27×10^{-6} Гн/м).

L_p – индуктивность дополнительного токоограничивающего реактора в цепях батарей, Гн.

ВЫВОД

Показатель единичной мощности УКРМ особенно актуален для металлургических предприятий черной и цветной металлургии, где показатели мощности определяет технология производства, а также габариты помещений печных РУ (выделяемые под оборудование УКРМ). К примеру, средняя мощность УКРМ ферросплавной печи 15 МВАр/10 кВ, т.е. согласно линейки мировых производителей требуется применение трех выключателей класса С2. Но данное решение приводит к значительному удорожанию проекта и снижению его надежности.

УКРМ является индивидуальным оборудованием. Количество серийных УКРМ на рынке крайне ограничено в связи с индивидуальностью проблем у каждого конкретного потребителя. На фоне большого спектра типов устройств, мощностного ряда, класса напряжений предложения выключателей класса С2 крайне ограничены. Обращение покупателя к заводу-изготовителю выключателя с просьбой выполнить до поставки контрольные испытания в DNV KEMA с целью получения сертификата соответствия классу С2 выключателя (подходящей мощности под УКРМ, ранее не подвергавшегося данным испытаниям) встречается отказом. Анализ обращений в DNV KEMA непосредственно Заказчиков УКРМ (Покупателя) показывает, что в дальнейшем Покупателем принимается решение о применении выключателей С2 с другими параметрами из-за не бюджетной стоимости сертификации.

Для коммутации мощных генераторов, конденсаторных батарей, шунтирующих реакторов и др. оборудования современные производители изготавливают мощные вакуумные силовые выключатели. Например, на фирме Toshiba в настоящее время производятся выключатели с номинальной отключающей способностью 100 кА, на номинальное напряжение 13,8 кВ и с номинальным током 3 000 А. Номинальное число коммутационных циклов этого выключателя составляет 20 000. На фирме Siemens с 1996 года в производство запущены вакуумные генератор-

ные выключатели с номинальной отключающей способностью 80 кА, на номинальное напряжение 17,5 кВ и с номинальным током 12 000 А. Но данные решения являются эксклюзивными и приводят к значительному росту бюджета реализации проекта УКРМ, соответственно инженеру приходится придерживаться стандартного ряда выключателей С2.

В ходе НТС с заводами-производителями ВВ было выяснено, что производители выключателей могут в неофициальном порядке гарантировать их нормальную работу в составе УКРМ с мощностью (величиной) емкостного тока не более 70% величины номинального тока выключателя. Одновременно, все выключатели поставляемые для работы в составе УКРМ на емкостной ток свыше 1000А подвергаются индивидуальным конструктивным модернизациям на заводе-изготовителе, что отражается на сроках поставки и цене.

Максимальное значение тока коммутации конденсаторных батарей независимо от сложности электрических схем всегда определяется величиной эквивалентного характеристического сопротивления схемы и может быть получено без составления и решения линейных дифференциальных уравнений, описывающих такой переходный процесс. Соответственно рассчитать ток включения конденсаторных батарей можно используя формулы (10) и (12): формулу (10) (КБ с одним выключателем), формулу (12) (каждая КБ со своим выключателем) [12].

Таким образом, в связи с производственной необходимостью, для реализации проектов УКРМ мощностью выше стандартных величин выключателей класса С2 применяются ВВ соответствующего тока класса не С2 на величину емкостного тока не более 70% номинального тока выключателя.

При условии соблюдения правильного алгоритма работы ВВ УКРМ данные решения обеспечивают нормальную работу оборудования. Правильный алгоритм работы:

- Включение нагрузки потребителя;
- Включение УКРМ;
- Выключение УКРМ;
- Выключение нагрузки.

Важным фактором является запрет автоматического повторного включения конденсаторных батарей до их полного разряда.

Опыт эксплуатации показывает, что для нормальной эксплуатации аппаратуры расчетный ток повторного зажигания не должен превышать ударный ток, на который рассчитан выключатель.

ВЫБОР КОММУТАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Л.А.Бессонов. Теоретические основы электротехники. "Высшая школа", Москва, 1973
2. К.С. Демирчан, Л.Р. Нейман. Теоретические основы электротехники. "Энергия", Москва, 1966 г.
3. А.М. Берковский, Ю.М. Лысков. Мощные конденсаторные батареи. "Энергия", Москва, 1967 г.
4. Б.А. Поляков. Конденсаторные установки для повышения коэффициента мощности, ГЭИ, М., 1962 г.
5. ГОСТ Р 52565-2006 «Выключатели переменного тока на напряжения от 3-750 кВ».
6. ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны».
7. ГОСТ 12.1.007-76 «Вредные вещества».
8. Правила устройства электроустановок, 7-е изд..
9. IEC 62271-200 «INTERNATIONAL STANDARD. «High-voltage switchgear and controlgear - AC metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1kV and including 52kV»
10. СТО 56947007-29.130.10.095-2011 «Выключатели переменного тока на напряжение от 3 до 1150 кВ» Указания по выбору.
11. В.Г. Гловацкий, И.В. Пономарев. Современные средства релейной защиты и автоматики электросетей.
12. Фельдман М. Расчет токов коммутации конденсаторных батарей // Новости электротехники. 2000. № 5 (5).
13. К.А. Набатов, В.В. Афонин «Высоковольтные вакуумные выключатели распределительных устройств» Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 96 с. – 75 экз.
14. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.240.10.028-2009 «Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ (НТП ПС)» от 13.04.2009
15. Евдокунин Г.А., Тилер Г. Современная вакуумная коммутационная техника для сетей среднего напряжения (технические преимущества и эксплуатационные характеристики), издание второе, исправленное и дополненное. – СПб: Издательство Терция, 2006. – 148с., с ил. ISBN 5-98305-059-1
16. Приказ N212 от 07.04.2008г. (в ред. Приказа Минприроды РФ от 20.08.2008 N 182) Федеральной службы по экологическому, техническому и атомному надзору «Об утверждении порядка организации работ по выдаче разрешений на допуск в эксплуатацию энергоустановок.
17. Siemens. TVM 6264c. Test documents for vacuum circuit-breaker 3AE1186-7 (12kV, 40kA, 3150A).
18. Siemens. TVM 9109a. Test documents for vacuum circuit-breaker 3AE1084-2Z "E13" (7.2kV, 25kA, 1250A).
19. Иск. письмо № 14-02-22-RUMOS от ООО "АББ" 06.02.2014г. в адрес ООО "МЭК".

Балабанов М.С. - главный инженер ООО «Международная Энергосберегающая Корпорация», Санкт-Петербург, e-mail: bms@iescorporation.org, тел. (812) 309-35-18