

УДК 621.316.91; 621.316.727

ВЛИЯНИЕ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА ВЕЛИЧИНУ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КОММУТАЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Кузьмин Роман Сергеевич¹,
romanich2013@mail.ru

Завалов Артем Александрович¹,
zavalovartem@mail.ru

Майнагашев Роман Александрович¹,
majnagashev@yandex.ru

Меньшиков Виталий Алексеевич¹,
menshikov_va@mail.ru

Кузьмин Илья Сергеевич²,
r1ml@inbox.ru

¹ Сибирский федеральный университет,
Россия, 660025, г. Красноярск, пер. Вузовский, 3.

² ООО «ГК «Рутас»»,
Россия, 660064, г. Красноярск, ул. Академика Вавилова, 2ж, оф. 2-09.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки более эффективных технических решений по ограничению перенапряжений, появляющихся при коммутации трансформаторов 6 (10)/0,4 кВ.

Цель: изучение влияния компенсации реактивной мощности на величину коммутационных перенапряжений при коммутации силовых трансформаторов 6 (10)/0,4 кВ и обоснование наиболее эффективных средств защиты трансформаторов от коммутационных перенапряжений.

Объекты: трансформаторы мощностью 250, 400, 630 и 1000 кВА, вакуумные выключатели, регулируемые конденсаторные установки.

Методы: инструментально-осциллографический, имитационное моделирование переходных процессов фазных напряжений выполнялось в MultiSim.

Результаты. Проведен анализ эффективности существующих средств защиты от коммутационных перенапряжений, возникающих при коммутации силовых трансформаторов 6 (10)/0,4 кВ. Выполнено компьютерное моделирование влияния компенсации реактивной мощности на величину коммутационных перенапряжений. Для подтверждения результатов моделирования были выполнены экспериментальные исследования, показаны осциллограммы коммутационных перенапряжений, возникающих при отключении силового трансформатора мощностью 250 кВА. Установлено, что устройства, осуществляющие компенсацию реактивной мощности, эффективно ограничивают перенапряжения, появляющиеся при отключении трансформаторов 6 (10)/0,4 кВ, если данные устройства связаны с обмоткой низкого напряжения. В городских электрических сетях для эффективной компенсации реактивной мощности предложено использовать конденсаторные установки с пофазной компенсацией и располагать их на вводах муниципальных и жилых зданий, а для ограничения коммутационных перенапряжений внедрять на трансформаторных подстанциях нерегулируемую конденсаторную установку с симметричной компенсацией.

Ключевые слова:

Реактивная мощность, коэффициент мощности, коммутационные перенапряжения, вакуумные выключатели, пофазная компенсация, срез тока, конденсаторная батарея, силовой понижающий трансформатор.

Введение

Современные системы электроснабжения 6–10 кВ характеризуются широким применением быстродействующих коммутационных аппаратов: вакуумные и элегазовые выключатели. Данные выключатели при коммутации силовых трансформаторов и электрических двигателей создают эффект среза тока, что приводит к возникновению опасных перенапряжений для изоляции обмоток трансформаторов и электрических двигателей и, как следствие, к снижению уровня надежности и безопасности системы электроснабжения в целом. Для ограничения перенапряжений в настоящее время используются ограничители перенапряжений нелинейные (ОПН), RC-ограничители и RC-гасители. Рассмотрим влияние компенсации реак-

тивной мощности (РМ) в сетях 0,4 кВ на величину перенапряжений, возникающих в первичной обмотке силового трансформатора 10 (6)/0,4 кВ.

Воздействие компенсации тока холостого хода трансформатора на перенапряжения при отключении трансформатора от сети

Изучение коммутационных перенапряжений (КП) в промышленных и городских электрических сетях 6–10 кВ показало, что перенапряжения негативно влияют на изоляцию обмоток силовых трансформаторов, если они коммутируются в режиме холостого хода или близком к нему [1–6].

При изучении КП учитывались следующие явления: срез тока, диэлектрическая прочность межкон-

тактного промежутка и процесс гашения дуги, обусловленный высокочастотным током в переходном процессе [7–12].

Срез тока – это величина остаточного тока в обмотке силового трансформатора при условии, что ток в линии за выключателем отсутствует. Это обусловлено возникновением высокочастотных колебаний тока, нестабильностью дуговой плазмы и большой скоростью восстановления диэлектрической прочности между контактами выключателя после прерывания тока.

Длительность существования перенапряжений обусловлена временем преобразования электромагнитной энергии, запасенной в обмотках силового трансформатора, в тепловую энергию после его отключения от сети.

Тепловая энергия связана с нагревом обмоток и магнитопровода трансформатора.

Очевидно, что для сокращения длительности перенапряжений и эффективного ограничения их величины необходимо использовать искусственный поглотитель энергии. В качестве искусственного поглотителя энергии можно использовать активное сопротивление, которое образует последовательное соединение с обмоткой трансформатора и дополнительной ёмкостью по отношению к земле или подключается параллельно ёмкости сети по отношению к земле. В первом случае активное сопротивление должно иметь постоянную величину, а во втором случае переменную.

Поэтому в современных системах электроснабжения для ограничения КП применяют устройства, которые увеличивают ёмкость на вводах первичной обмотки трансформатора по отношению к земле (RC-ограничители) или используют устройства с резким изменением проводимости изоляции первичной обмотки трансформатора по отношению к земле (ОПН).

Широкое использование RC-ограничителей лимитировано допустимой величиной тока однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) в сетях с изолированным режимом нейтрали, а в сетях с компенсированным режимом нейтрали широкое применение RC-ограничителей может привести к увеличению мощности дугогасящего реактора. Это обусловлено тем, что искусственное увеличение ёмкости на вводе первичной обмотки трансформатора по отношению к земле приведёт к росту тока ОЗЗ [13, 14].

RC-гасители и ОПН не влияют на величину тока ОЗЗ, поэтому не имеют ограничений по количественному фактору.

Мгновенное значение величины коммутационного импульса определяется следующим выражением

$$U(t) = i_0(t) \sqrt{\frac{L}{C}},$$

где $i_0(t)$ – срез тока; L – индуктивность обмотки трансформатора; C – ёмкость первичной обмотки трансформатора по отношению к земле. Таким образом, эффективного ограничения величины перенапряжений можно достичь за счёт уменьшения величины среза тока посредством компенсации индуктивной составляющей среза тока.

Установлено, что максимальные перенапряжения возникают при отключении силовых трансформаторов в режиме холостого хода [15–18].

В режиме холостого хода ток, протекающий по первичной обмотке трансформатора, имеет в основном индуктивный характер, поэтому и срез тока будет иметь аналогичный характер. Исходя из этого, снижения величины среза тока можно достичь за счёт протекания по первичной обмотке трансформатора искусственно созданного ёмкостного тока, то есть использовать принцип компенсации РМ [19].

Компенсация индуктивных токов нагрузки в сетях 6–10 кВ осуществляется в основном за счёт использования конденсаторных установок (КУ).

В случае подключения КУ к первичной обмотке трансформатора ёмкостной ток компенсации будет протекать по цепи: КУ – кабельная линия – выключатель. Это приведет к снижению среза тока в выключателе. Величина индуктивного тока, протекающего в первичной обмотке силового трансформатора, не изменится, так как ёмкостной ток КУ не протекает по первичной обмотке трансформатора. Это приведет к возникновению перенапряжений при отключении силового трансформатора от сети.

Если КУ подключить к вторичной обмотке силового трансформатора, ёмкостной ток, создаваемый КУ, будет протекать по первичной и вторичной обмоткам трансформатора, кабельной линии и выключателю. Это приведёт к снижению среза тока в выключателе и тока холостого хода в первичной обмотке трансформатора, что повлечёт за собой снижение величины КП при отключении трансформатора от сети.

Компьютерное моделирование, а в дальнейшем и экспериментальные исследования подтвердили достоверность вышеуказанной гипотезы.

Основные результаты компьютерного моделирования

Моделирование воздействия компенсации тока силового трансформатора в режиме холостого хода на величину перенапряжений, возникающих при отключении трансформатора от сети, производилось применительно к силовым трансформаторам мощностью от 250 до 1000 кВА включительно.

При моделировании оценивались перенапряжения как в первичной, так и во вторичной обмотках трансформатора на основе их кратности. Кратность перенапряжений в первичной обмотке трансформатора рассчитывалась по формуле

$$K_1 = \frac{U_1(t)_{max}}{U_{1H}},$$

где $U_1(t)_{max}$ – максимальное значение коммутационного импульса в первичной обмотке трансформатора; U_{1H} – номинальное напряжение первичной обмотки трансформатора.

Кратность перенапряжений во вторичной обмотке трансформатора рассчитывалась по формуле

$$K_2 = \frac{U_2(t)_{max}}{U_{2H}},$$

где $U_2(t)_{max}$ – максимальное значение коммутационного импульса во вторичной обмотке трансформатора.

ра; U_{2H} – номинальное напряжение вторичной обмотки трансформатора.

На основе моделирования были получены зависимости

$$K_1 = f\left(\frac{I_c}{K_{TP}I_{XX}}\right),$$

$$K_2 = f\left(\frac{I_c}{K_{TP}I_{XX}}\right),$$

где I_c – емкостной ток КУ, подключенной к вторичной обмотке трансформатора; I_{XX} – ток холостого хода в первичной обмотке трансформатора; K_{TP} – коэффициент трансформации. Данные зависимости показаны на рис. 1, 2.

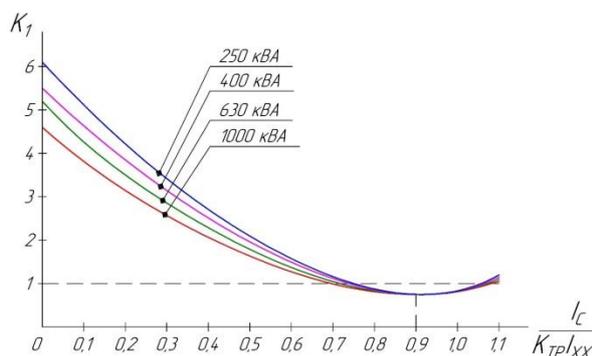


Рис. 1. Зависимость $K_1 = f\left(\frac{I_c}{K_{TP}I_{XX}}\right)$ для трансформаторов мощностью 250, 400, 630 и 1000 кВА

Fig. 1. Dependence $K_1 = f\left(\frac{I_c}{K_{TP}I_{XX}}\right)$ for transformers with rated power of 250, 400, 630 and 1000 kVA

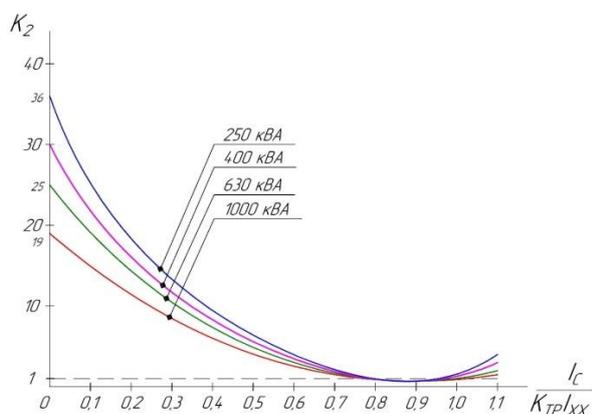


Рис. 2. Зависимость $K_2 = f\left(\frac{I_c}{K_{TP}I_{XX}}\right)$ для трансформаторов мощностью 250, 400, 630 и 1000 кВА

Fig. 2. Dependence $K_2 = f\left(\frac{I_c}{K_{TP}I_{XX}}\right)$ for transformers with rated power of 250, 400, 630 and 1000 kVA

Изучение зависимостей, показанных на рис. 1, 2, указывает на то, что при снижении величины тока холостого хода трансформатора в 3 раза и более КП в первичной и вторичной обмотках не возникают, то есть когда выполняется условие: $0,7 \leq \frac{I_c}{K_{TP}I_{XX}} \leq 1,1$.

В качестве примера на рис. 3 показаны осциллограммы, отражающие результаты моделирования

возникновения КП при отключении силового трансформатора 6 (10)/0,4 мощностью 250 кВА при условии, что величина тока холостого хода скомпенсирована в три раза.

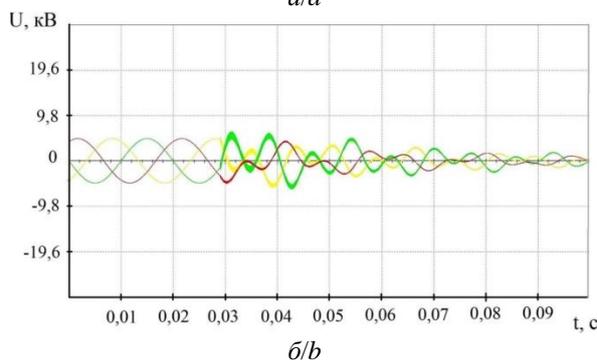
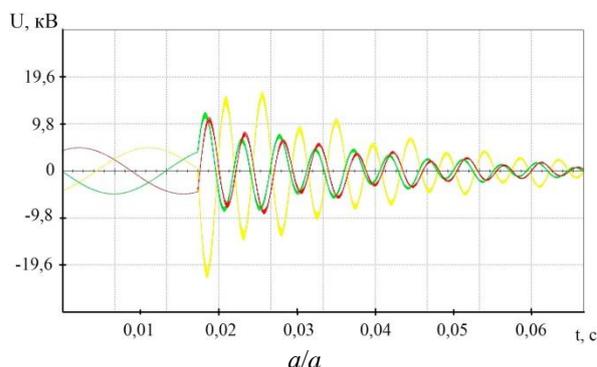


Рис. 3. Осциллограммы коммутационных перенапряжений, возникающие в первичной обмотке трансформатора мощностью 250 кВА при его отключении: а) ток холостого хода равен паспортной величине, $K_1 = 3,8$; б) ток холостого хода трансформатора скомпенсирован в 3 раза, $K_1 = 0,98$

Fig. 3. Oscillograms of switching overvoltages arising in primary winding of a transformer with rated power of 250 kVA when it is disconnected: a) no-load current is equal to rated value, $K_1 = 3,8$; b) no-load current is 3 times less than rated value, $K_1 = 0,98$

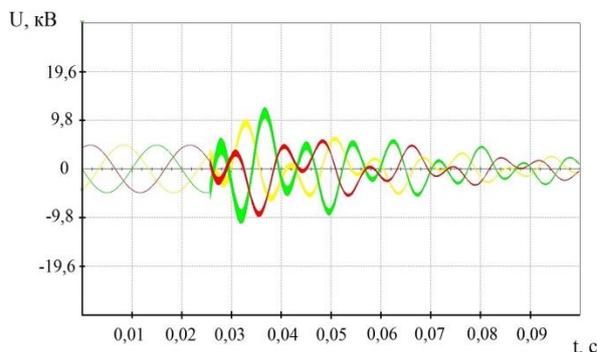


Рис. 4. Осциллограмма коммутационных перенапряжений, возникающих в первичной обмотке трансформатора мощностью 250 кВА при его отключении, при условии перекомпенсации тока холостого хода на 30 %, $K_1 = 2,13$

Fig. 4. Oscillogram of switching overvoltages arising in primary winding of a transformer with rated power of 250 kVA when it is disconnected. No-load current is overcompensated by 30 %, $K_1 = 2,13$

Из осциллограмм видно, что в переходном режиме амплитуды напряжений в фазах А, В, С после отключения трансформатора соизмеримы с амплитудами фазных напряжений до отключения трансформатора, то есть КП не возникают.

Перекомпенсация тока холостого хода трансформатора приводит к возникновению КП [20], что подтверждается осциллограммами, представленными на рис. 4, где перекомпенсация тока холостого хода трансформатора достигает 30 %. В данных условиях кратность перенапряжений составляет 2,4.

Основные результаты экспериментальных исследований

Результаты моделирования были подтверждены экспериментальными исследованиями, которые производились на силовых трансформаторах 6/0,4 кВ мощностью 250 и 630 кВА.

В экспериментах использовался прибор комплексного типа ПКК-57 для измерения тока в первичной обмотке трансформатора и коэффициента мощности. Для фиксации КП в первичной и вторичной обмотках трансформатора использовался делитель напряжения ДНЕК-10 и осциллограф Tektronix TDS. Для компенсации тока холостого хода вышеуказанных трансформаторов использовалась КУ типа УКМФ-58-04-25-1У3. Мощность установки составила 25 кВар, а шаг регулирования был равен 1 кВар.

Обработка результатов экспериментальных исследований позволила получить зависимость $K_1 = f(\cos \varphi)$. Данная зависимость, которая показывает, что при

значении « $\cos \varphi$ » больше 0,8 КП не возникают, так как кратность КП меньше 1, представлена на рис. 5.

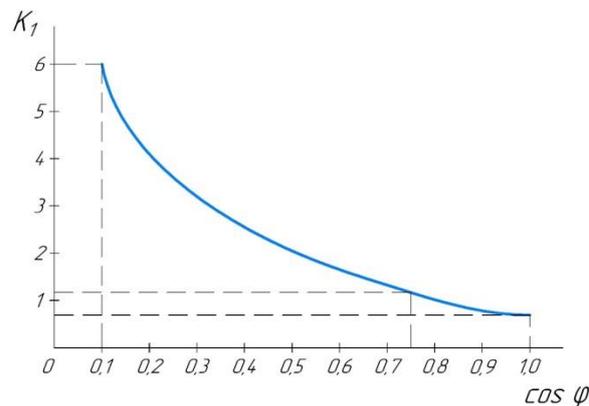


Рис. 5. Зависимость $K_1 = f(\cos \varphi)$

Fig. 5. Dependence $K_1 = f(\cos \varphi)$

На рис. 6.1–6.4 приведены осциллограммы максимальных перенапряжений, зафиксированные при отключении силового трансформатора 6/0,4 кВ мощностью 250 кВА при различных значениях коэффициента мощности в первичной обмотке.

Анализ осциллограмм, представленных на рис. 6.1–6.4, подтверждает характер изменения переходных процессов в первичной и вторичной обмотках силового трансформатора 6/0,4 кВ мощностью 250 кВА, полученных в результате моделирования отключения трансформатора от сети.

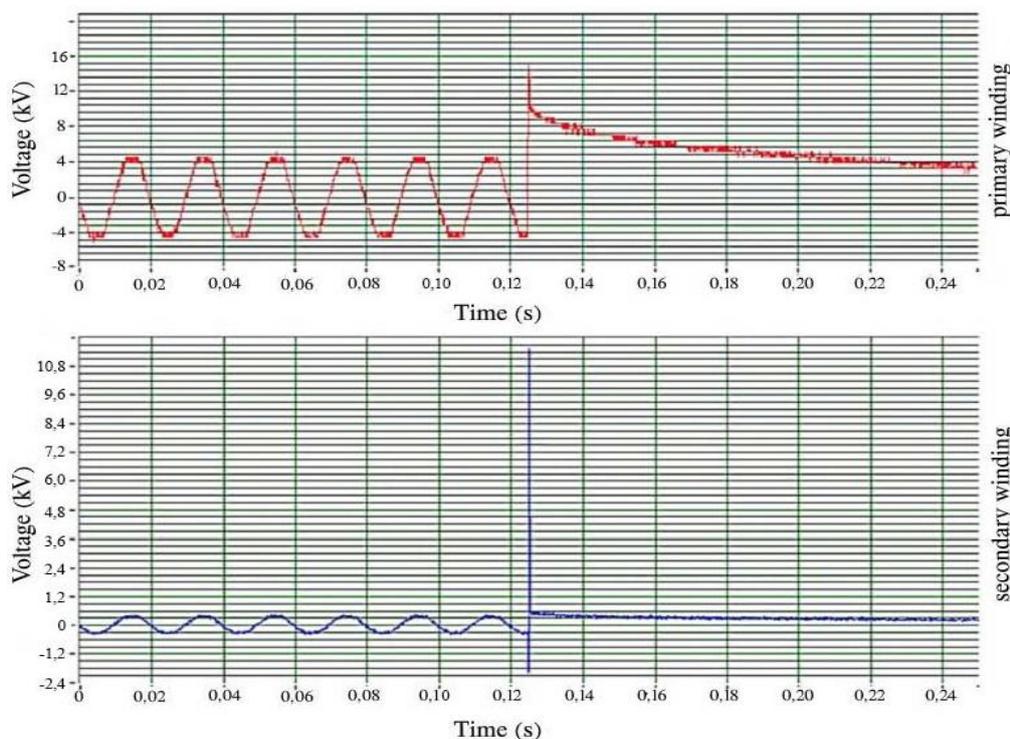


Рис. 6.1. Осциллограммы максимальных перенапряжений, зафиксированные при отключении силового трансформатора 6/0,4 кВ мощностью 250 кВА. $\cos \varphi=0,3$; $K_1=3,2$; $K_2=35$

Fig. 6.1. Oscillograms of maximum overvoltages recorded when 6/0,4 kV power transformer with a rated power of 250 kVA is disconnected. $\cos \varphi=0,3$; $K_1=3,2$; $K_2=35$

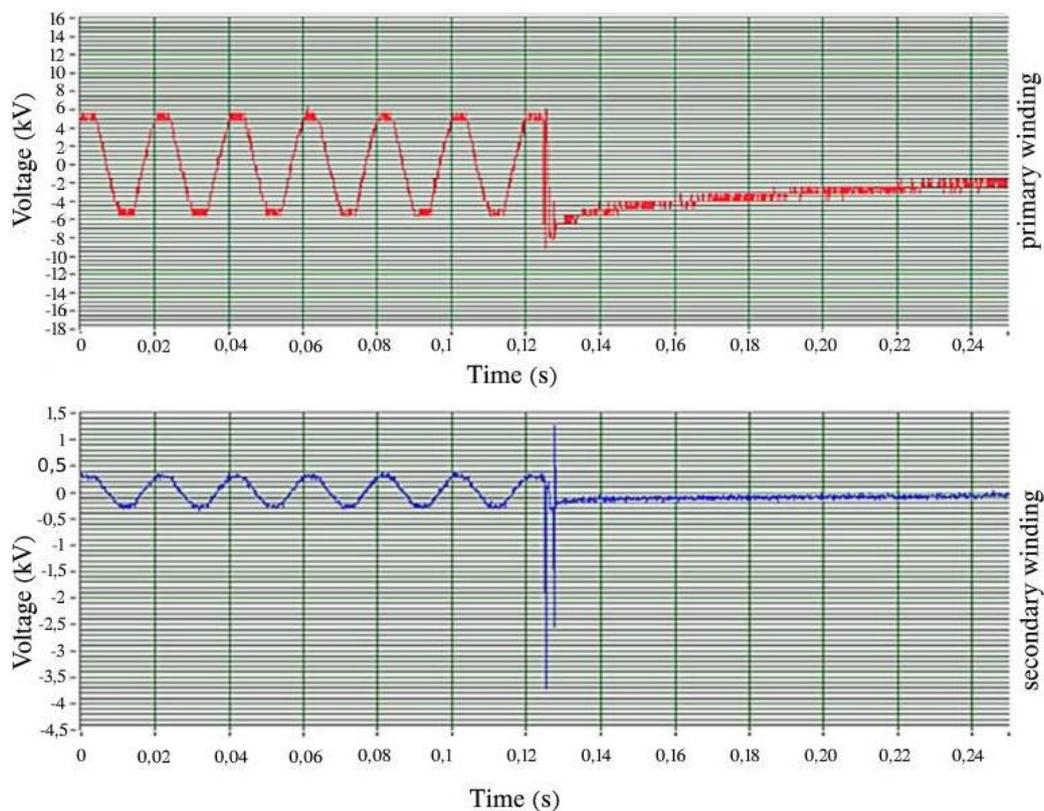


Рис. 6.2. Осциллограммы максимальных перенапряжений, зафиксированные при отключении силового трансформатора 6/0,4 кВ мощностью 250 кВА. $\cos\varphi=0,5$; $K_1=2,05$; $K_2=17$

Fig. 6.2. Oscillograms of maximum overvoltages recorded when 6/0,4 kV power transformer with a rated power of 250 kVA is disconnected. $\cos\varphi=0,5$; $K_1=2,05$; $K_2=17$

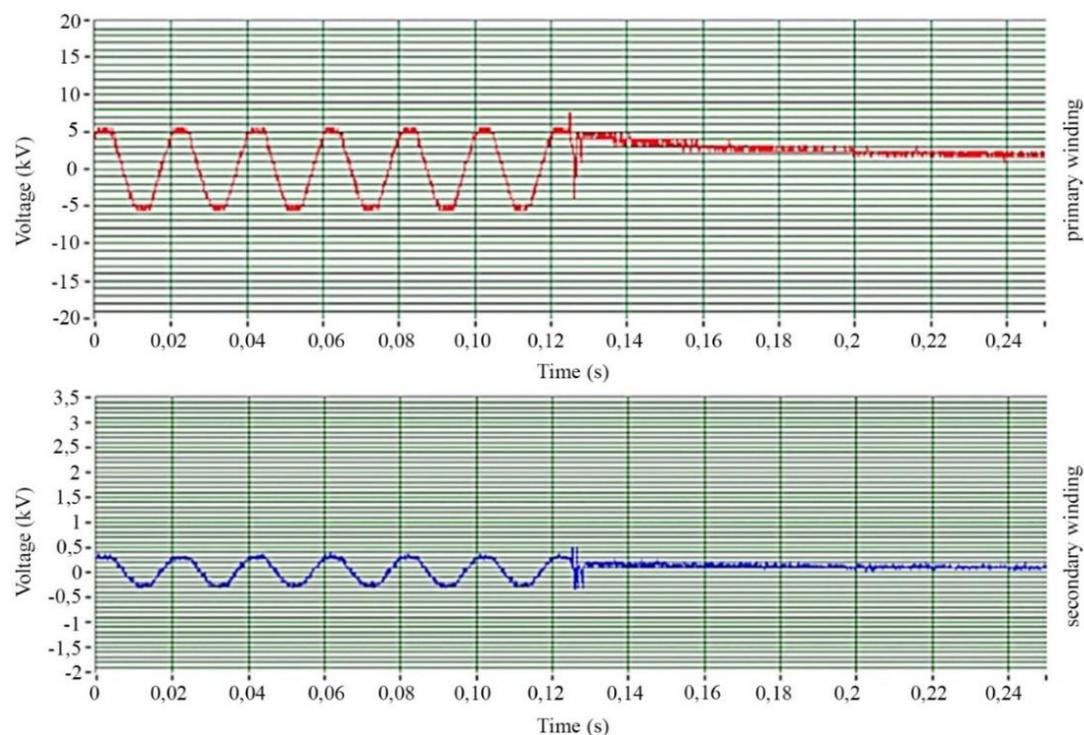


Рис. 6.3. Осциллограммы максимальных перенапряжений, зафиксированные при отключении силового трансформатора 6/0,4 кВ мощностью 250 кВА. $\cos\varphi=0,75$; $K_1=1,3$; $K_2=1,5$

Рис. 6.3. Oscillograms of maximum overvoltages recorded when 6/0,4 kV power transformer with a rated power of 250 kVA is disconnected. $\cos\varphi=0,75$; $K_1=1,3$; $K_2=1,5$

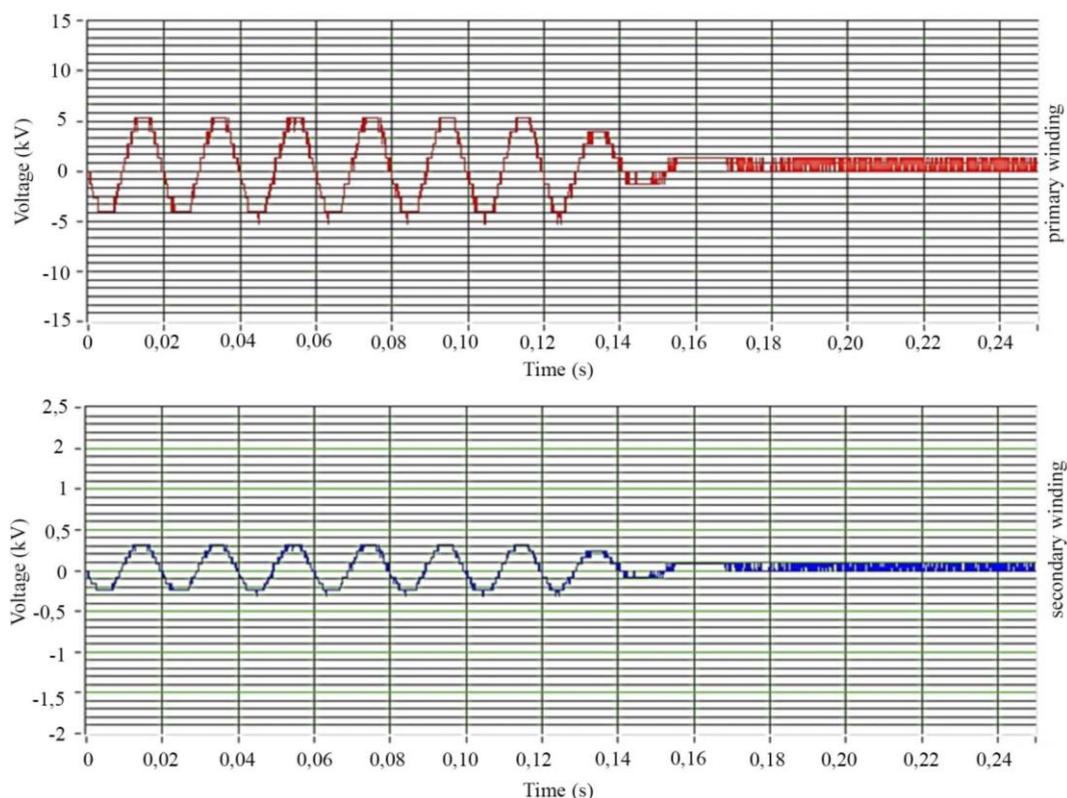


Рис. 6.4. Осциллограммы максимальных перенапряжений, зафиксированные при отключении силового трансформатора 6/0,4 кВ мощностью 250 кВА. $\cos\varphi=0,92-0,96$; $K_1=0,75$; $K_2=0,75$

Fig. 6.4. Oscillograms of maximum overvoltages recorded when 6/0,4 kV power transformer with a rated power of 250 kVA is disconnected. $\cos\varphi=0,92-0,96$; $K_1=0,75$; $K_2=0,75$

Следовательно, подтверждается гипотеза влияния компенсации РМ на величину перенапряжений, возникающих при отключении трансформатора без нагрузки. Исходя из этого, КУ, подключенные к вторичной обмотке силовых трансформаторов, можно использовать как для компенсации РМ, так и для защиты трансформаторов от КП.

Одновременная компенсация РМ и подавление КП в сетях промышленных предприятий

Рассмотрим применение метода одновременной компенсации РМ и подавления КП на базе КУ в электрических сетях промышленных предприятий.

Нагрузки электрических сетей промышленных предприятий в основном состоят из трехфазных электроприемников. Таким образом, распределение нагрузки относительно фаз сети в электрических сетях промышленных предприятий происходит симметрично (равномерно).

Наиболее распространенными средствами компенсации РМ в сетях промышленных предприятий являются автоматически регулируемые КУ с симметричной компенсацией по фазам сети и компенсаторы на основе широтно-импульсной модуляции, известные как активные фильтры. Однако активные фильтры имеют большую себестоимость в сравнении с КУ и являются источниками ВГ, что делает их менее предпочтительными в применении для задачи компенсации РМ.

Существующие высоковольтные КУ являются низкоэффективными по следующим причинам:

- количество ступеней регулирования не более трех (при ступенчатом регулировании);
- высокая стоимость высоковольтных конденсаторов и высоковольтных вакуумных контакторов;
- преждевременный выход из строя КУ из-за влияния ВГ (при тиристорном регулировании).

Было установлено, что силовой трансформатор передаёт емкостную составляющую РМ в сеть ВН при подключении КУ к обмотке НН, тем самым производится компенсация РМ в этой сети и коэффициент мощности доводится до установленных допустимых значений. В результате чего становится возможным использование низковольтных конденсаторов и надежных низковольтных быстродействующих малогабаритных контакторов для компенсации РМ в высоковольтных сетях. Использование низковольтной аппаратуры взамен высоковольтной позволяет значительно снизить затраты на компенсацию РМ в сетях промышленных предприятий.

Основной причиной выхода из строя КУ является термическое разрушение конденсаторов из-за протекания токов высших гармоник. Исследования показали, что силовые трансформаторы, мощность которых не превышает значение в 1000 кВА, обладают высокой степенью подавления ВГ. В результате при подключении КУ к обмотке НН силового трансформатора мощностью до 1000 кВА повышается надежность

эксплуатации КУ, за счёт подавления ВГ трансформатором.

Также принцип компенсации РМ в высоковольтной сети за счёт КУ, подключенной к обмотке НН силового трансформатора, соответствует условию эффективного подавления КП за счёт снижения среза тока в выключателе и обмотке ВН трансформатора. Для исключения условий возникновения КП необходимо иметь постоянно включенную КУ, подключенную к обмотке НН трансформатора, которая будет обеспечивать « $\cos\phi$ » в первичной обмотке трансформатора больше значения 0,92.

На рис. 7 представлена модернизированная КУ, которая будет осуществлять одновременную эффективную компенсацию РМ и подавление КП в высоковольтных сетях промышленных предприятий при одновременном обеспечении высокой надежности КУ и снижении её себестоимости.

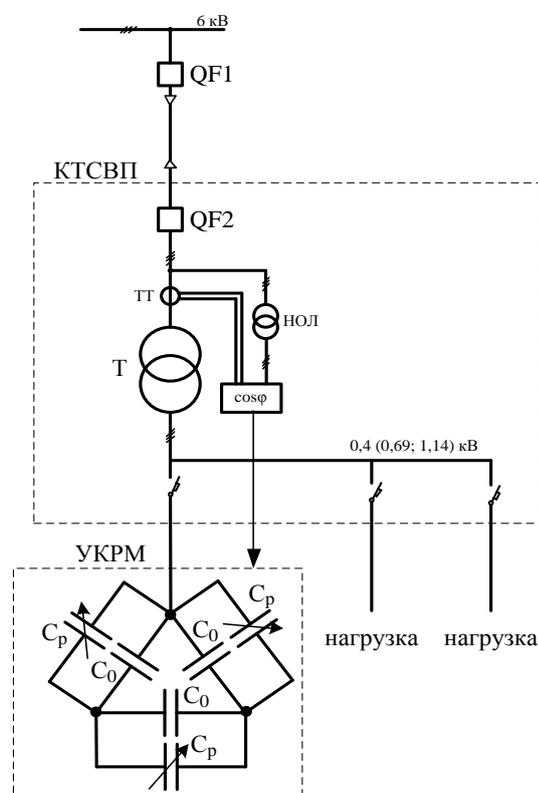


Рис. 7. Схема модернизированной автоматически регулируемой КУ для использования в сетях промышленных предприятий, предназначенной для компенсации РМ и подавления КП, где C_p – регулируемая ёмкость, C_0 – постоянная ёмкость

Fig. 7. Scheme of modernized automatic capacitor unit for use in networks of industrial enterprises, designed to compensate the reactive power and suppress switching overvoltage, where C_p – regulate capacity, C_0 – constant capacity

Одновременная компенсация РМ и подавление КП в городских сетях

Рассмотрим принцип одновременной компенсации РМ и подавления КП применительно к городским электрическим сетям.

Городские сети напряжением до 1000 В эксплуатируются с глухозаземленным режимом нейтрали. Большинство электроприемников в таких сетях – однофазные нагрузки, в связи с этим распределение электрических нагрузок происходит несимметрично или неравномерно относительно фаз сети.

В данных условиях использование КУ с симметричной компенсацией по фазам сети оказывается неэффективным ввиду того, что на одной из фаз может быть достигнута полная компенсация РМ, а на двух других появятся режимы «недокомпенсации» и/или «перекомпенсации» из-за разной величины потребления РМ фазами сети.

В [21] был предложен метод и устройство независимой пофазной компенсации РМ, заключающийся в целенаправленной компенсации РМ в отдельных фазах сети без воздействия на другие.

Устройство независимой пофазной компенсации РМ содержит автоматически регулируемые конденсаторы, подключенные параллельно в каждой фазе сети и соединенные по схеме «звезда» с нулевым проводом. Исходя из замеров коэффициента мощности, производимых отдельно для каждой фазы сети, конденсаторы генерируют необходимую РМ в каждую фазу сети индивидуально.

Из-за неравномерного распределения нагрузки по фазам сети появляются несбалансированные составляющие тока обратной и нулевой последовательности, в результате чего величина тока в нейтральном проводе может превышать величину токов в фазах сети, что может привести к термическому разрушению нейтрального провода. Термическое разрушение нейтрального провода в свою очередь приводит к перекосу фазных напряжений, которое оказывает крайне негативное влияние на электроприборы, подключенные к электросети, в частности может привести к выходу из строя различного электрооборудования, используемого в быту.

Благодаря эффективной независимой компенсации РМ по фазам низковольтной сети снижается ток в нейтральном проводе, так как снижаются токи нулевой и обратной последовательности. Таким образом, при внедрении пофазной компенсации РМ наряду с повышением эффективности использования электроэнергии также повышается надежность электрической сети.

Наилучший результат компенсации РМ достигается при расположении КУ в непосредственной близости от электроприемников с низким коэффициентом мощности. Рациональным решением для городских электрических сетей низкого класса напряжения является расположение КУ на вводах жилых и муниципальных зданий.

Протяженность линий электросети от электроприемников до трансформаторной подстанции (ТП) в городской среде может быть значительной. В связи с чем для обеспечения одновременной эффективной компенсации РМ и подавления КП может быть использован принцип, проиллюстрированный на рис. 8, где 1 – нерегулируемая постоянно включенная КУ, 2 – КУ с автоматически регулируемой ёмкостью для пофазной компенсации РМ, 3 – регуляторы-измерители.

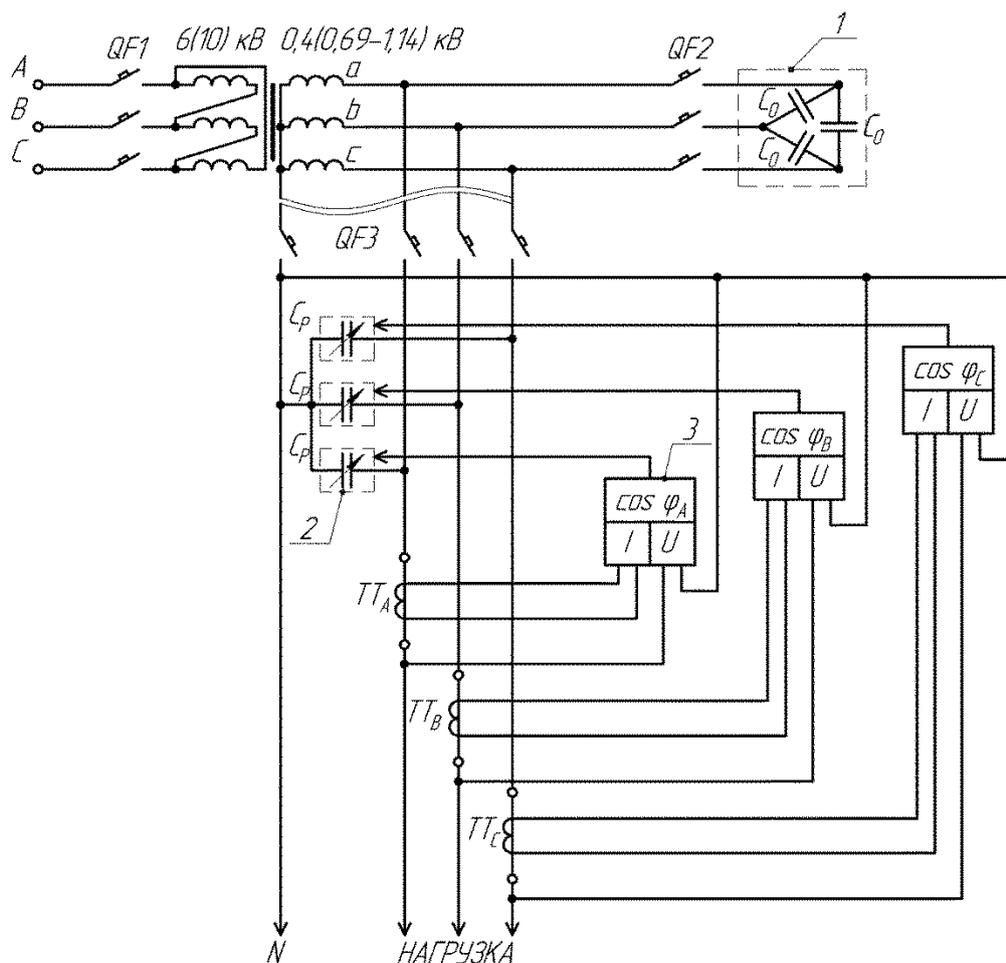


Рис. 8. Принцип одновременной компенсации РМ и подавления КП в городских электрических сетях на базе устройств пофазной компенсации

Fig. 8. Principle of simultaneous compensation of reactive power and suppression of switching overvoltage in residential electric networks based on devices for individual phase compensation of reactive power

Данный принцип предполагает внедрение КУ с пофазной независимой компенсацией РМ на вводы жилых и муниципальных зданий для эффективной компенсации РМ в городской среде и повышения надежности электрической сети за счёт снижения тока в нейтральном проводе. Кроме того, на ТП со стороны обмотки НН силового трансформатора для обеспечения эффективного подавления КП, возникающих при коммутации трансформатора, предполагается внедрение нерегулируемой постоянно включенной КУ с симметричной компенсацией по фазам, ёмкость которой выбирается исходя из необходимого снижения величины тока холостого хода трансформатора.

Таким образом, в городских электрических сетях напряжением до 1000 В будет обеспечиваться одновременная эффективная компенсация РМ и подавление КП при коммутации силового трансформатора, в случае переключения линии на питание от другой ТП во время аварийной ситуации, при проведении планово-предупредительного ремонта и прочих случаев, при которых требуется коммутация силового трансформатора.

Сравнительный анализ устройств ограничения перенапряжений, возникающих при коммутации силовых трансформаторов

Для выявления наиболее эффективного средства для защиты силовых трансформаторов от КП, возникающих при коммутации силового трансформатора, проведем анализ и сравнение существующих средств защиты от КП с предлагаемым в данной статье решением, заключающемся в использовании КУ, предназначенных для компенсации РМ, в качестве средства для ограничения КП. Стоит отметить что встречаются случаи, когда силовые трансформаторы эксплуатируются вовсе без защиты от КП.

В настоящее время для защиты силовых трансформаторов от КП широко используются ОПН. ОПН оказывается не всегда эффективным. В работе ОПН при определенной частоте коммутационного импульса наблюдается зона замирания, в которой ОПН не работает. Также ОПН обладают низкой термической устойчивостью в режиме ОЗЗ, это может привести к их термическому разрушению и выходу из строя. ОПН не влияют на величину и характер тока ОЗЗ.

Также в меньшей степени используются устройства на базе RC-цепей, такие как RC-ограничители и RC-гасители [22].

RC-ограничители – это устройства, в конструкции которых используются RC-цепи, собранные по схеме звезда с заземленной нейтральной точкой. RC-ограничители оказывают влияние на величину тока ОЗЗ, что может привести к ухудшению условий электробезопасности, а также, возможно, потребуется изменение режима нейтрали сети. В работе RC-ограничителя зоны замирания не наблюдается.

RC-гасители – это устройства, в конструкции которых используются RC-цепи, собранные по схеме звезда с изолированной нейтральной точкой или по схеме треугольник. Преимущество RC-гасителей над RC-ограничителями заключается в отсутствии влияния на величину и характер тока ОЗЗ.

Устройства компенсации реактивной мощности (УКРМ) на базе конденсаторных установок, подключенные к низковольтной обмотке силового трансформатора, исключают условия для возникновения КП в обмотке высокого напряжения из-за снижения величины среза тока при отключении трансформаторов. Данный эффект наблюдается, если коэффициент мощности в любом режиме работы трансформатора превышает значение 0,92. Кроме этого, УКРМ не влияют на величину и характер тока ОЗЗ в сети 10 кВ, так как конденсаторы подключаются к обмотке НН.

Эффективность устройств, предназначенных для защиты силовых трансформаторов от КП, оценивалась на основе метода относительных критериев [23].

Количество анализируемых устройств определяет предельное значение каждого критерия. В статье рассматривается четыре устройства, следовательно, максимальная величина критерия будет равна 4, а минимальная 1. При отрицательном воздействии определенных условий на работу устройств значение критерия будет минимальным. При отсутствии влияния определенных условий на работу устройств величина критерия будет иметь максимальное значение, а частичное влияние оценивается величиной критерия, равной от 2 до 3.

Результирующее значение относительной величины рассматриваемых критериев рассчитывается согласно выражению

$$K_{\text{и}} = \prod_{i=1}^n K_i,$$

где K_i – величина рассматриваемого критерия.

Отметим, что не все критерии оказывают влияние на функционирование устройства, а именно масса и вес устройства.

Исходя из этого конечная величина функционального критерия рассчитывается по формуле

$$K_{\text{ф}} = \prod_{i=1}^n K_{i\text{ф}},$$

где $K_{i\text{ф}}$ – величина конкретного функционального критерия.

Значение относительного критерия эффективности находится по формуле

$$K_{\text{э}} = \frac{K_{\text{ф}}}{K_{\text{и}}}.$$

Устройства с наибольшим значением относительного критерия эффективности будут наиболее эффективно осуществлять защиту силовых трансформаторов от КП. Эффективность одного устройства по отношению к другому оценивалась согласно формуле

$$\Phi = \frac{K_{\text{э}j}}{K_{\text{э}y}},$$

где $K_{\text{э}j}$ и $K_{\text{э}y}$ – относительные критерии эффективности каждого из рассмотренных устройств в сравнении друг с другом.

В табл. 1, 2 приведены результаты анализа эффективности вышеперечисленных средств защиты от КП.

Оценим эффективность каждого устройства относительно остальных, пронумеровав их следующим образом: 1 – ОПН, 2 – RC-ограничитель, 3 – RC-гаситель, 4 – УКРМ.

$$\begin{aligned} \Phi_{4-3} &= 0,333/0,25 = 1,33; \quad \Phi_{3-4} = 0,25/0,33 = 0,75; \\ \Phi_{4-2} &= 0,333/0,1667 = 2; \quad \Phi_{3-2} = 0,25/0,1667 = 1,5; \\ \Phi_{4-1} &= 0,333/0,0625 = 5,33; \quad \Phi_{3-1} = 0,25/0,0625 = 4; \\ \Phi_{2-4} &= 0,1667/0,333 = 0,5; \quad \Phi_{1-4} = 0,0625/0,33 = 0,19; \\ \Phi_{2-3} &= 0,1667/0,25 = 0,67; \quad \Phi_{1-3} = 0,0625/0,25 = 0,25; \\ \Phi_{2-1} &= 0,1667/0,0625 = 2,67; \quad \Phi_{1-2} = 0,0625/0,1667 = 0,37. \end{aligned}$$

Проанализировав значения относительных критериев эффективности каждого устройства и сопоставив их между собой, можно прийти к выводу, что наименее эффективным средством для ограничения КП, возникающих при коммутации силового трансформатора, будет ОПН, а наиболее эффективным – УКРМ. Так, эффективность УКРМ будет больше на 33 % эффективности RC-гасителя, на 100 % эффективности RC-ограничителя, на 433 % эффективности ОПН. Стоит отметить, что относительная эффективность УКРМ будет выше остальных устройств даже при том, что значение эффективности его массогабаритного показателя будет ниже, чем у остальных устройств.

Таким образом, можно сделать вывод, что для эффективного ограничения КП, возникающих при коммутации силовых трансформаторов, наиболее рационально будет использовать УКРМ, которые подключаются к обмотке низкого напряжения силового трансформатора.

Выводы

1. В достаточной мере совпадающие результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований показывают, что для ликвидации условий возникновения перенапряжений при коммутации трансформаторов 6 (10)/0,4 кВ могут быть использованы конденсаторные установки, это позволит повысить надежность и эффективность системы электроснабжения в целом.

Таблица 1. Эффективность устройств защиты от КП (ОПН, RC-ограничитель)

Table 1. Surge protection devices efficiency (Surge arrester, Snubber circuit with grounded neutral point)

Критерий/Criterion	Тип устройства/Device type			
	ОПН (1)/surge arresters (1)		RC-ограничитель (2) Snubber circuit with grounded neutral point (2)	
	Величина критерия Criterion value	О.В.К. ¹ R.V.C. ¹	Величина критерия Criterion value	О.В.К. ¹ R.V.C. ¹
Уровень ограничения КП Restriction level of switching overvoltage	(2,4–3,2) U_H	1	(1,6–1,8) U_H	2
Термическая устойчивость в нормальном режиме Thermal stability in normal operation	Термически устойчив Thermally stable	2	Термически устойчив при отсутствии ВГ Thermally stable in absence of higher current harmonics	1
Термическая устойчивость в режиме ОЗЗ Thermal stability in single-phase ground fault mode	Высокая вероятность тер- мического разрушения ² High probability of ther- mal failure ²	1	Термически устойчив при отсутствии ВГ тока Thermally stable in absence of higher current harmonics	2
Влияние частоты КИ на работу устройства Influence of frequency of switching impulse on de- vice	При $f_{ki} > 45\text{кГц}$ «зона замирания» At $f_{ki} > 45\text{kHz}$ non-working zone	1	Не влияет Does not affect	2
Влияние ВГ тока на работу устройства Influence of higher current harmonics on operation of device	Не влияет Does not affect		Может вызывать термиче- ское разрушение Can cause thermal failure	1
Влияние устройства на величину тока ОЗЗ Influence of device on current value of a single- phase ground fault	Не влияет Does not affect	4	Одно устройство увеличивает емкостной ток ОЗЗ на 0,5–0,8 А Device increases capacitive current	1
Масса основного элемента, кг Base weight, kg	(1–1,2)	4	12	2
Высота, длина, ширина, диаметр, мм Height, length, width, diameter, mm	h=150 мм; width=(80–100)	4	240×160×120	3
Значение K_H/K_H value	512		48	
Значение K_Φ/K_Φ value	32		8	
Значение K_Σ/K_Σ value	0,0625		0,1667	

Примечание: 1 – относительная величина критерия.

Note: 1 – relative value of criterion.

Таблица 2. Эффективность устройств защиты от КП (RC-гаситель, устройства для компенсации РМ)

Table 2. Surge protection devices efficiency (Snubber circuit with isolated neutral point, Devices for compensation of re-
active power)

Критерий/Criterion	Тип устройства/Device type			
	RC-гаситель (3) Snubber circuit with isolated neutral point (3)		УКРМ (4) Devices for reactive power compensation (4)	
	Величина критерия Criterion value	О.В.К. ¹ R.V.C. ¹	Величина критерия Criterion value	О.В.К. ¹ R.V.C. ¹
Уровень ограничения КП Restriction level of switching overvoltage	(1,5–1,75) U_H	3	(1,5–1,75) U_H	3
Термическая устойчивость в нормальном режиме Thermal stability in normal operation	Термически устойчив Thermally stable	4	Термически устойчив Thermally stable	4
Термическая устойчивость в режиме ОЗЗ Thermal stability in single-phase ground fault mode	Термически устойчив Thermally stable	3	Термически устойчив Thermally stable	3
Влияние частоты КИ на работу устройства Influence of switching impulse frequency on device operation	Не влияет Does not affect	3	Не влияет Does not affect	3
Влияние ВГ тока на работу устройства Influence of higher current harmonics on device op- eration	Может вызывать терми- ческое разрушение Can cause thermal failure	3	Может вызывать терми- ческое разрушение Can cause thermal failure	3
Влияние на величину тока ОЗЗ Influence of a single-phase ground fault on current value	Не влияет Does not affect	4	Не влияет Does not affect	4
Масса основного элемента, кг Base weight, kg	12	2	12	2
Высота, длина, ширина, диаметр, мм Height, length, width, diameter, mm	270×180×120	2	270×180×120	2
Значение K_H/K_H value	5184		4608	
Значение K_Φ/K_Φ value	1296		1536	
Значение K_Σ/K_Σ value	0,25		0,333	

Примечание: 1 – относительная величина критерия.

Note: 1 – relative value of criterion.

2. Применительно к электрическим сетям промышленных предприятий для эффективного подавления КП необходимо использовать автоматически регулируемые конденсаторные установки с нерегулируемой первой ступенью. Ёмкость конденсаторов нерегулируемой первой ступени выбирается из условия обеспечения коэффициента мощности в первичной обмотке 0,92 и более при отсутствии нагрузки.
3. В городских электрических сетях для эффективной компенсации реактивной мощности необходимо использовать конденсаторные установки с пофазной компенсацией и располагать их на вводах муниципальных и жилых зданий. Для ограничения КП необходимо на трансформаторной подстанции располагать нерегу-

лируемую постоянно включенную конденсаторную установку с симметричной компенсацией, ёмкость которой задается исходя из условия эффективного ограничения тока холостого хода трансформатора.

4. Ограничение коммутационных перенапряжений силового трансформатора и пофазная компенсация РМ позволяют существенно повысить надежность электрической сети.
5. Исходя из сравнительного анализа, проведенного на основе метода относительных критериев, можно заключить, что наиболее эффективным устройством для ограничения КП, появляющихся в результате коммутации силового трансформатора, является устройство для компенсации РМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаврилова Е.В. Совершенствование методов оценки, прогнозирования и средств ограничения коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения 6–10 кВ: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Красноярск, 2011. – 20 с.
2. Барышников Д.В. Экспресс-методы оценки и прогнозирования коммутационных перенапряжений в системах электроснабжения 6–10 кВ промышленных предприятий: дис. ... канд. техн. наук. – Красноярск, 2010. – 144 с.
3. Кузьмин Р.С. Совершенствование методов и средств снижения однофазных замыканий на землю в распределительных сетях 6–35 кВ промышленных предприятий: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Красноярск, 2006. – 24 с.
4. The experience acquired sizing snubbers to mitigate switching transients in industrial power systems / C.S. Mardegan, D.D. Shipp, L.A.R. Melo, M.R. Santana // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2016. – V. 52. – № 5. – P. 3644–3654.
5. Performance evaluation of online transformer internal fault detection based on transient overvoltage signals / X. Zhao, C. Yao, Z. Zhao, A. Abu-Siada // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2017. – V. 24. – № 6. – P. 3906–3915.
6. Investigation on switching overvoltage in an offshore wind farm and its mitigation methods based on laboratory experiments / G.J. Zhou, W. Tang, Y. Xin, Q. Wu // IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). – Kota Kinabalu, 2018. – P. 189–193.
7. Roguski A.T. Experimental investigation of the dielectric recovery strength between the separating contacts of vacuum circuit breakers // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1989. – V. 4. – № 2. – P. 1063–1069.
8. Perkins J.F., Bhasavanich D. Vacuum switchgear application study with reference to switching surge protection // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1983. – V. IA-19. – № 5. – P. 879–888.
9. Comparison of performance of switching technologies on E Cigre motor simulation circuit / J.D. Gibbs, D. Koch, P. Malkin, K.J. Cornick // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1989. – V. 4. – № 3. – P. 1745–1750.
10. Telander S.H., Wilhelm M.R., Stump K.B. Surge limiters for vacuum circuit breaker switchgear // IEEE Transaction on Power Delivery. – 1987. – V. 2. – № 1. – P. 107–116.
11. Greenwood A.N., Kurtz D.R., Sofianek J.C. A guide to the application of vacuum circuit breakers // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1971. – V. PAS-90. – № 4. – P. 1589–1597.
12. Серов В.И., Шуцкий В.И., Ягудаев Б.М. Методы и средства борьбы с замыканиями на землю в высоковольтных системах горных предприятий. – М.: Изд-во «Наука», 1985. – 136 с.
13. Шуцкий В.И. Критерии оптимизации режима изолированной нейтрали 6–10 кВ горных предприятий // Электричество. – 1984. – № 9. – С. 11–17.
14. Евдокунин Г.А., Тиллер Г. Современная вакуумная коммутационная техника для сетей среднего напряжения. – СПб.: Изд-во Сизова М.П., 2006. – 148 с.
15. Field experiments and analysis on the faults caused by switching shunt reactors using 10 kV vacuum circuit breakers / Y. Zhou, W. Tang, X. Yang, M. Yang, Y. He, W. Sima // 2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON). – Guangzhou, 2018. – P. 3680–3685.
16. Ground fault temporary overvoltages in MV networks: evaluation and experimental tests / A. Cerretti, F.M. Gatta, A. Geri, S. Lauria, M. Maccioni, G. Valtorta // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2012. – V. 27. – № 3. – P. 1592–1600.
17. Transient recovery voltage: a case study applied to industrial systems / G.C. De Miranda, I.A., Camargos H.F. Primo, H.T. Calenzani // 2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE). – Niteroi, 2018. – P. 1–5.
18. Майнагашев Р.А. Компенсация реактивной мощности за счёт использования естественных средств // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции. – Красноярск, 2008. – С. 106–110.
19. Майнагашев Р.А. Коммутационные перенапряжения в распределительных сетях 6 кВ шахт и рудников и способ их эффективного ограничения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Красноярск, 2011. – 19 с.
20. Повышение эффективности компенсации реактивной мощности на основе устройств пофазной компенсации / С.В. Кузьмин, А.А. Завалов, Р.С. Кузьмин, В.А. Меньшиков // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. – 2020. – Т. 13. – № 1. – С. 14–24.
21. Sutherland P.E. Snubber circuit design for transformers in an urban high rise office building // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2015. – V. 51. – № 6. – P. 4347–4356.
22. Леман Э. Теория точечного оценивания. – М.: Наука, 1991. – 448 с.

Поступила 01.03.2021 г.

Информация об авторах

Кузьмин Р.С., кандидат технических наук, доцент кафедры электрификации горно-металлургического производства Сибирского федерального университета.

Завалов А.А., аспирант кафедры электрификации горно-металлургического производства Сибирского федерального университета.

Майнагашев Р.А., кандидат технических наук, доцент кафедры электрификации горно-металлургического производства Сибирского федерального университета.

Меньшиков В.А., кандидат технических наук, доцент кафедры электрификации горно-металлургического производства Сибирского федерального университета.

Кузьмин И.С., генеральный директор, ООО «ГК «Рутас»».

UDC 621.316.91; 621.316.727

INFLUENCE OF REACTIVE POWER COMPENSATION ON OVERVOLTAGES VALUE WHEN SWITCHING POWER TRANSFORMERS

Roman S. Kuzmin¹,
pomanich2013@mail.ru

Artem A. Zavalov¹,
zavalovartem@mail.ru

Roman A. Mainagashev¹,
majnagashev@yandex.ru

Vitalii A. Menshikov¹,
menshikov_va@mail.ru

Ilya S. Kuzmin²,
r1ml@inbox.ru

¹ Siberian Federal University,
3, Vuzovsky street, Krasnoyarsk, 660025, Russia.

² Research and Production Enterprise «Rutas» LLC,
2zh, of. 2-09, Academician Vavilov street, Krasnoyarsk, 660064, Russia.

The relevance of the research arises from the need to develop technical solutions to limit switching overvoltages that occur when switching power transformers and effective compensation of reactive power.

The main aim of the research is to study the influence of reactive power compensation on value of switching overvoltages when switching power transformers 6 (10)/0,4 kV and substantiation of the most effective means of protecting power transformers from switching overvoltages.

Objects: transformers with a rated power of 250, 400, 630 and 1000 kVA; vacuum circuit-breaker; individual phase compensation devices.

Methods. Instrumental-oscillographic, simulation of transient processes of phase voltages was performed in MultiSim.

Results. The authors have analyzed the efficiency of existing protection equipment against switching overvoltages arising during switching of power transformers 6 (10)/0,4 kV. Computer simulation of influence of reactive power compensation on switching overvoltage value was performed. To confirm the simulation results, experimental studies were performed. The oscillograms of switching overvoltages that occur when a power transformer with rated power of 250 kVA is disconnected are shown. It was established that devices designed for reactive power compensation can be successfully used to suppress switching overvoltages when switching power transformers, provided that, these devices are connected to the low voltage winding of the transformer. In residential electric networks for effective compensation of reactive power it is proposed to use capacitor units with individual phase compensation and to place them on the input bus of municipal and residential buildings. For suppression of switching overvoltages in residential electric networks, it is necessary to introduce a capacitor unit with symmetrical unregulated compensation at transformer substations.

Key words:

Reactive power, power factor, switching overvoltages, vacuum circuit breaker, individual phase compensation, chopping current, capacitor unit, power reducing transformer.

REFERENCES

- Gavrilova E.V. *Sovershenstvovanie metodov otsenki, prognozirovaniya i sredstv ograniceniya kommutatsionnykh perenapryazheniy v sistemakh elektrosnabzheniya 6–10 kV*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Improving assessment methods, predicting and means of limiting switching overvoltages in power supply systems of 6–10 kV. Cand. Diss. Abstract]. Krasnoyarsk, 2011. 20 p.
- Baryshnikov D.V. *Ekspress-metody otsenki i prognozirovaniya kommutatsionnykh perenapryazheniy v sistemakh elektrosnabzheniya 6–10 kV promyshlennykh predpriyatiy*. Dis. Kand. nauk [Express-methods for assessing and predicting switching overvoltages in 6–10 kV power supply systems of industrial enterprises. Cand. Diss.]. Krasnoyarsk, 2010. 144 p.
- Kuzmin R.S. *Sovershenstvovanie metodov i sredstv snizheniya odnofaznykh zamykaniy na zemlyu v raspredelitelnykh setyakh 6–35 kV promyshlennykh predpriyatiy*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Improving methods and means of reducing single-phase earth faults in 6–35 kV distribution networks of industrial enterprises. Cand. Diss. Abstract]. Krasnoyarsk, 2006. 24 p.
- Mardegan C.S., Shipp D.D., Melo L.A.R., Santana M.R. The experience acquired sizing snubbers to mitigate switching transients in industrial power systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2016, vol. 52, no. 5, pp. 3644–3654.
- Zhao X., Yao C., Zhao Z., Abu-Siada A. Performance evaluation of online transformer internal fault detection based on transient overvoltage signals. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2017, vol. 24, no. 6, pp. 3906–3915.
- Zhou G.J., Tang W., Xin Y., Wu Q. Investigation on switching overvoltage in an offshore wind farm and its mitigation methods based on laboratory experiments. *IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*. Kota Kinabalu, Malaysia, 2018. pp. 189–193.
- Roguski A.T. Experimental investigation of the dielectric recovery strength between the separating contacts of vacuum circuit breakers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1989, vol. 4, no. 2, pp. 1063–1069.
- Perkins J.F., Bhasavanich D. Vacuum switchgear application study with reference to switching surge protection. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1983, vol. IA-19, no. 5, pp. 879–888.
- Gibbs J.D., Koch D., Malkin P., Cornick K.J. Comparison of performance of switching technologies on E Cigre motor simulation circuit. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1989, vol. 4, no. 3, pp. 1745–1750.
- Telander S.H., Wilhelm M.R., Stump K.B. Surge limiters for vacuum circuit breaker switchgear. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 1987, vol. 2, no. 1, pp. 107–116.

11. Greenwood A.N., Kurtz D.R., Sofianek J.C. A guide to the application of vacuum circuit breakers. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1971, vol. PAS-90, no. 4, pp. 1589–1597.
12. Serov V.I., Shutsky V.I., Yagudaev B.M. *Metody i sredstva borby s zamykaniyami na zemlyu v vysokovolnykh sistemakh gornykh predpriyatiy* [Methods and means of combating earth faults in high-voltage systems of mining enterprises]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 136 p.
13. Shutsky V.I. *Kriterii optimizatsii rezhima izolirovannoy neytrali 6–10 kV gornykh predpriyatiy* [Criteria for optimizing the isolated 6–10 kV neutral mode of mining enterprises]. *Elektrichestvo*, 1984, vol. 9, pp. 11–17.
14. Evdokunin G.A., Tiller G. *Sovremennaya vakuumnaya kommutatsionnaya tekhnika dlya setey srednego naryazheniya* [Modern vacuum switching technology for medium voltage networks]. St.-Petersburg, Sizov M.P. Publ., 2006. 148 p.
15. Zhou Y., Tang W., Yang X., Yang M., He Y., Sima W. Field experiments and analysis on the faults caused by switching shunt reactors using 10 kV vacuum circuit breakers. *2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON)*. Guangzhou, China, 2018. pp. 3680–3685.
16. Cerretti A., Gatta F.M., Geri A., Lauria S., Maccioni M., Val-torta G. Ground fault temporary overvoltages in MV networks: evaluation and experimental tests. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2012, vol. 27, no. 3, pp. 1592–1600.
17. De Miranda G.C., Camargos I.A., Primo H.F., Calenzani H.T. Transient recovery voltage: a case study applied to industrial systems. *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*. Niteroi, Brazil, 2018. pp. 1–5.
18. Maynagashev R.A. Kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti za schet ispolzovaniya estestvennykh sredstv [Reactive power compensation through use of natural resources]. *Energoeffektivnost sistem zhizneobespecheniya goroda. Materialy IX Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Energy Efficiency of City Life Support Systems. Materials of the IX All-Russian Scientific and Practical Conference]. Krasnoyarsk, 2008. pp. 106–110.
19. Maynagashev R.A. *Kommutatsionnye perenapryazheniya v raspredelitelnykh setyakh 6 kV shakht i rudnikov i sposob ikh effektivnogo ogranicheniya*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Switching overvoltages in distribution 6 kV networks of mines and the way to effectively limit them. Cand. Diss. Abstract]. Krasnoyarsk, 2011. 19 p.
20. Kuzmin S.V., Zavalov A.A., Kuzmin R.S., Menshikov V.A. Increase of reactive power compensation efficiency on the basis of individual phase compensation devices. *Journal of Siberian Federal University Engineering & Technologies*, 2020, vol. 13, no. 1, pp. 14–24. In Rus.
21. Sutherland P.E. Snubber circuit design for transformers in an urban high rise office building. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2015, vol. 51, no. 6, pp. 4347–4356.
22. Leman E. *Teoriya tochechnogo otsenivaniya* [Relative criteria theory]. Moscow, Nauka Publ., 1991. 448 p.

Received: 1 March 2021.

Information about the authors

Roman S. Kuzmin, Cand. Sc., associate professor, Siberian Federal University.

Artem A. Zavalov, postgraduate student, Siberian Federal University.

Roman A. Mainagashev, Cand. Sc., associate professor, Siberian Federal University.

Vitalii A. Menshikov, Cand. Sc., associate professor, Siberian Federal University.

Ilya S. Kuzmin, chief executive officer, Group of companies «Rutas».