Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LIII, вып. 1, 1966 г.

УДК 621.064.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВКЛЮЧЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ ЧЕРЕЗ УСТАНОВКУ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ

В. Г Бауман, В. М. Квятковский, О. В. Иванов, Б. И. Комаров, Е. М. Проскуряков

Установка продольной компенсации (УПК) потерь напряжения в распределительной сети добычного участка впервые испытана в производственных условиях на одном из участков шахты им. С. М. Кирова комбината «Сланцы» в 1964 г. В опытной эксплуатации УПК доказана целесообразность и эффективность автоматического регулирования напряжения последовательными конденсаторами в сети участка. Включение установки продольной компенсации позволяет получить повышение напряжения на распределительном пункте лавы на 20—25% при пусках двигателей и на 10—15% при номинальной нагрузке.

Условиями эксплуатации была поставлена задача включения УПК в распределительную сеть, питающую несколько добычных участков шахты. В связи с этим возникла необходимость исследования процессов включения трансформаторов через последовательные конденсаторы. При таких включениях ненагруженных трансформаторов, как известно, могут возникать резонансные колебания как субгармонические, так и на основной частоте. *

Необходимо было выявить условие возникновения резонансных колебаний при включении трансформаторов и установить параметры УПК, при которых эти колебания исключаются.

Исследования проведены на физической модели сети, где моделированы три трансформатора: один типа ТМ-320/6 и два типа ТМШ-180/6. Трансформаторы модели имеют мощности соответственно 5 и 2,5 *кв·а*.

При исследовании по схеме модели сети рис. 1 рассмотрены практически возможные случаи включения трансформаторов: 1) включение одного ненагруженного трансформатора; 2) включение двух или трех ненагруженных трансформаторов; 3) подключение ненагруженного трансформатора к одному или двум, работающим вхолостую.

Переходные процессы при всех видах коммутации наблюдались на электронном осциллографе. Для качественной и количественной оценки наиболее характерных режимов было проведено осциллографирование процессов.

Параметры УПК модели сети изменялись в пределах, удовлетворяющих условиям компенсации потерь напряжения в реальной сети

* А. И. Долгинов. Резонанс в электрических цепях и системах. Госэнергоиздат, 1957.

(емкостное сопротивление x_c от 0,1 до 0,3; шунтирующее сопротивление $r_ш$ от 0 до 4). Значения x_c, $r_ш$ указаны в относительных единицах к номинальным величинам трансформатора $T1$ большей мощности: первичному току $I_{1н}$ 5,15 *а*, вторичному напряжению $U_{2н}$ 220 *в* и базисному сопротивлению $z_б$ 42,5 *ом*.

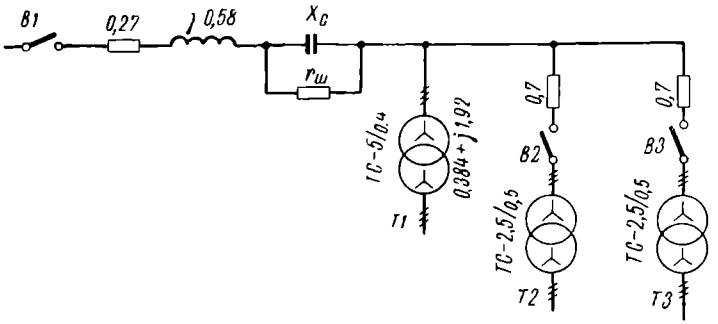


Рис. 1. Схема модели сети.

Влияние насыщения магнитной цепи при постоянном первичном напряжении у трансформатора $T1$ учитывалось изменением числа витков первичной обмотки на ±5%. Трансформаторы на участковых подстанциях шахт иногда работают именно на таких выводах первичной обмотки.

Как показали исследования, при подключении одного или двух ненагруженных трансформаторов при емкостном сопротивлении $0{,}1 < x_c <$

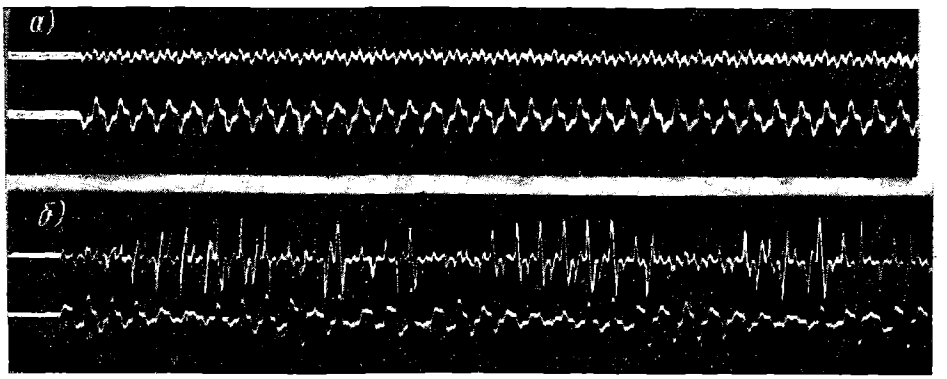


Рис. 2. Осциллограммы переходных процессов тока i_1 и напряжения на конденсаторах U_c при включении трансформатора $T1$ (w_1 $w_{1н}$) и $r_ш = 4$: *а* — $x_c = 0{,}167$; *б* — $x_c = 0{,}105$; $M_i = 6{,}65$ *а/мм*; $M_{u\,c} = 65$ *в/мм*.

$< 0{,}3$ возможно возникновение субгармонических колебаний (на 1/3 основной частоты) с установившимися амплитудами (рис. 2, *а*) или биениями амплитуд (рис. 2, *б*).

Величина амплитудных значений токов и напряжений в сети в значительной мере определяется величиной емкостного сопротивления. С увеличением x_c амплитуды тока i_1 и напряжения U_c значительно уменьшаются. Так, при x_c 0,105, $r_ш = 4$ (рис. 2, *б*) амплитуды тока и напряжения достигают значений $I_{1m} = (4{,}5 \div 7)\, I_{1н}$, $U_{c\,m} = (0{,}4 \div 1{,}0)\, U_{2\,н}$, а при $x_c = 0{,}157$, $r_ш = 4$ (рис. 2, *а*) максимальные значения тока уменьшаются: $I_{1m} = (1{,}3 \div 2{,}0)\, I_{1н}$, $U_{c\,m} = (0{,}5 \div 0{,}7)\, U_{2\,н}$.

Феррорезонанс напряжения на основной частоте при включении одного или двух трансформаторов возникает при $x_c > 0{,}5$, т. е. при значениях, превышающих емкостное сопротивление, необходимое по условиям компенсации потерь напряжения. *

Уменьшением шунтирующего сопротивления $r_ш$ можно устранить резонансные колебания. Как видно на рис. 3, *а*, резонансные колебания невозможны при значениях шунтирующего сопротивления, расположенных ниже соответствующей кривой. Минимальное шунтирующее сопротивление, по условиям исключения резонансных колебаний, $r_ш \leqslant (7{,}5 \div 10)\, x_c$.

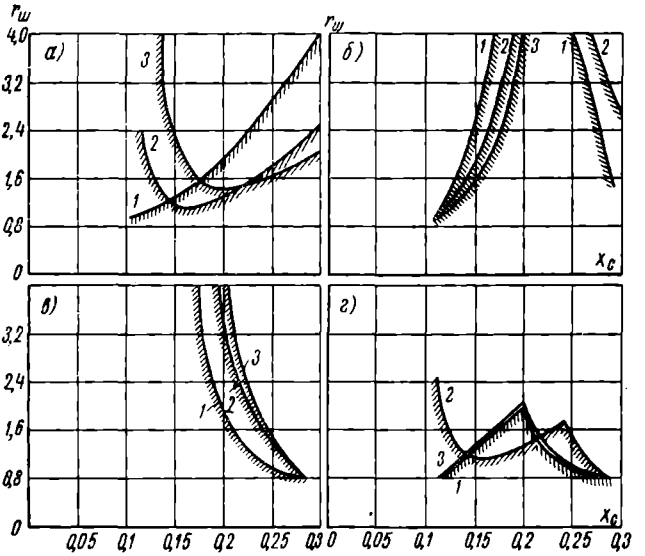


Рис. 3. Области затухающих колебаний при: *а* — включении одного трансформатора *Т*1; *б* — включении одновременно трех трансформаторов; *в* — подключении трансформатора *Т*3 к трансформаторам *Т*1 и *Т*2, работающим вхолостую; *г* — любой коммутации включения трансформаторов.

1 — $w_1 = 0{,}95\, w_{1н}$; *2* — $w_1 = w_{1н}$; *3* — $w_1 = 1{,}05\, w_{1н}$.

Экспериментальные данные по включению одного трансформатора подтверждены в процессе промышленных испытаний УПК в сети участка на шахте им. Кирова в 1964 г. и на шахте № 1 в 1965 г. Одновременное включение трех трансформаторов вызывает субгармонический резонанс, аналогичный представленному на рис. 2, для емкостного сопротивления $x_c < 0{,}22$. При $x_c > 0{,}22$ включение может сопровождаться феррорезонансом напряжений на основной частоте и на конденсаторах возникают перенапряжения $U_{c\,m} = 3{,}2\, U_{2н}$, а в сети большие токи $I_1 = 15{,}4\, I_{1н}$, что приводит к срабатыванию максимальной защиты.

На рис. 3, *б* в плоскости параметров x_c, $r_ш$ построены области затухающих резонансных колебаний, ограниченные осью значений x_c и кривыми *1*, *2*, *3*, соответствующими различным положениям переключателя числа витков первичной обмотки трансформатора *Т*1. Как видно из графика, минимальная величина шунтирующего сопротивления при

---

* А. В. Рысьев и др. Регулирование напряжения последовательными конденсаторами и самовозбуждение асинхронных двигателей в рудничных сетях. Зап. ЛГИ, т. XLV, вып. I, 1961.

$x_c < 0{,}22$ определяется условиями исключения субгармонического резонанса и равна $r_ш \leqslant x_c$. При $x_c > 0{,}22$ минимальная величина $r_ш$ определяется по условию предотвращения феррорезонанса напряжений на основной частоте. Если величина емкостного сопротивления выбрана в пределах $0{,}2 < x_c < 0{,}25$, то резонансные колебания невозможны даже при $r_ш \geqslant (20 \div 30)\, x_c$.

Подключение ненагруженного трансформатора к одному или двум, работающим вхолостую (рис. 3, *в*), при значениях емкостного сопротивления УПК модели $0{,}17 < x_c < 0{,}3$ сопровождалось феррорезонансом напряжений на основной частоте со срабатыванием защиты. При $x_c < 0{,}17$ субгармонические колебания возникали лишь при $r_ш \geqslant (20 \div 30)\, x_c$.

Величину шунтирующих сопротивлений УПК по условиям исключения резонансных колебаний, очевидно, необходимо выбирать с учетом всех практически возможных коммутаций. По данным опытов для отдельных коммутаций (рис. 3, *а*, *б*, *в*), на рис. 3, *г* построены области затухающих резонансных колебаний при всех возможных случаях включения трансформаторов.

Таким образом, величину шунтирующих сопротивлений (при данном значении x_c) можно рекомендовать исходя из условия демпфирования резонансных колебаний при включении трансформаторов через УПК. Если величина емкостного сопротивления выбрана в пределах $0{,}1 < x_c < 0{,}20$, то минимальное шунтирующее сопротивление должно быть $r_ш \leqslant (7 \div 10)\, x_c$, при $x_c > 0{,}2$ соответственно $r_ш \leqslant (10 \div 30) x_c$.

Результаты исследований на физической модели использованы при включении УПК для компенсации потерь напряжения в распределительную сеть 6 *кв*, питающую шесть добычных участков шахты им. С. М. Кирова комбината «Сланцы». Суммарная установленная мощность трансформаторов шести участковых подстанций 1500 *кв · а*.

Промышленные испытания при всех практически возможных условиях коммутации включения трансформаторов через УПК при $x_c = (0{,}06 \div 0{,}27)$, $r_ш = (0{,}55 \div 1{,}1)$, выявили полное соответствие качественных показателей, полученных на физической модели. При включении одного или двух трансформаторов ТМ-320/6 или одновременном включении трех трансформаторов ТМШ-180/6 при величине емкостного сопротивления $0{,}16 > x_c \geqslant 0{,}08$ возникали незатухающие субгармонические колебания, если $r_ш \geqslant 10 x_c$. Феррорезонанс напряжений при данных параметрах УПК возникал при одновременном подключении всех шести ненагруженных трансформаторов суммарной мощностью 1500 *кв · а*, а также при подключении одного трансформатора к четырем или пяти трансформаторам, работающим вхолостую.

В процессе испытаний установлены параметры УПК, исключающие возможность возникновения субгармонических и феррорезонансных колебаний при любых включениях шести трансформаторов при $x_c = 0{,}08$, $r_ш = 0{,}7$.

Эти параметры УПК при испытании в реальной сети хорошо согласуются с данными, полученными на физической модели. Некоторые отклонения можно объяснить различием характеристик холостого хода трансформаторов модели и реальных, а также увеличением числа трансформаторов в реальной сети.

Параметры опытной установки продольной компенсации в окончательном виде ($x_c = 0{,}06$, $r_ш = 0{,}55$) выбраны по условиям исключения самовозбуждения асинхронных двигателей. УПК находится в эксплуатации на шахте им. С. М. Кирова с октября 1965 г.

Выводы

1. По данным исследования включения трансформатора через УПК на физической модели сети в промышленных условиях выбрана величина шунтирующих сопротивлений УПК по условию исключения резонансных колебаний.

2. При всех практически возможных условиях включения нескольких трансформаторов в зависимости от величины емкостного сопротивления могут возникать резонансные колебания субгармонические или на основной частоте.

3. При $x_c < 0{,}2$ включение трансформаторов сопровождается субгармоническими колебаниями, для устранения которых величина шунтирующего сопротивления должна быть в пределах $r_ш \leqslant (7 \div 10)\ x_c$.

4. При емкостном сопротивлении $x_c > 0{,}2$ возникает феррорезонанс напряжений на основной частоте, который исключается при $r_ш \leqslant (10 \div 30)\ x_c$.