

# Резонансные перенапряжения в сети 35 кВ с компенсированной нейтралью в условиях однофазных коротких замыканий в питающей сети 110 кВ

ДРОЖЖИНА И. Л.; nio\_bolid@ngs.ru  
 НАУМКИН И. Е., канд. техн. наук; ienau@yandex.ru  
 ЛИСКЕ А. Г., ТЕЛЕГИН А. В.; nio\_bolid@mail.ru  
 ООО «Болид»  
 630015, г. Новосибирск, Электrozаводская ул., 2, корп. 6



И. Л. Дрожжина      И. Е. Наумкин      А. Г. Лиске      А. В. Телегин

Показано, что при однофазных коротких замыканиях в питающей сети 110 кВ на стороне шин 35 кВ возникают опасные для подстанционного оборудования резонансные перенапряжения в условиях компенсации ёмкостных токов дугогасительными реакторами. Режим нейтрали с низкоомным резистивным заземлением в сети 35 кВ позволяет задемпфировать резонансные перенапряжения наряду с ограничением дуговых, коммутационных и феррорезонансных перенапряжений.

Ключевые слова: резонансное перенапряжение, дугогасительный реактор, резистивное заземление, низкоомный резистор.

**В** электрических сетях напряжением 110 кВ используются следующие режимы заземления нейтрали:

- глухозаземлённая, с подключением нейтралей трансформаторов непосредственно к заземляющему контуру;
- у одной части трансформаторов нейтраль глухо заземлена, а у другой части нейтраль изолирована от земли (нейтрали присоединяются через отключённые разъединители) — *эффективное* заземление. При этом осуществляется ограничение: при любых коммутациях в сети не должно образовываться изолированных участков, в которых отсутствуют трансформаторы с заземлёнными нейтральями.

Обычно частичное (эффективное) заземление нейтрали в сетях 110 кВ используется для ограничения однофазных токов короткого замыкания (КЗ). Также с этой целью нейтраль может быть заземлена через реактор или резистор. Если токи КЗ достаточно малы, то в сети все нейтрали трансформаторов глухо заземлены. Далее для сети напряжением 110 кВ рассматривается только режим глухозаземлённой нейтрали.

В настоящее время в российских сетях 35 кВ используются следующие режимы заземления нейтрали:

- изолированная от земли;
- компенсированная, с подключением дугогасящего реактора (ДГР) [катушки Петерсена];
- резистивная с подключением резистора;

– комбинированная с параллельным подключением ДГР и резистора.

Все опасные явления, присущие распределительным сетям с изолированной

ной нейтралью, хорошо известны. Трудности эксплуатации таких распределительных сетей связаны с возникновением дуговых, коммутационных и феррорезонансных перенапряжений [1]. Также изучены явления в распределительных сетях с резонансно заземлённой нейтралью [2]. Обычно при проведении исследований использовался стандартный подход, при котором рассматривалась непосредственно сеть напряжением 6 – 35 кВ и коммутации в этой сети.

В статье рассмотрены явления, возникающие в сети 35 кВ при КЗ на стороне высшего напряжения трансформатора 110 кВ. Дополнительно исследованы отличия протекающих процессов в распределительной сети 35 кВ в зависимости от типов применённых трансформаторов.

## Характеристики электрической сети и моделирование

### Характеристики электрической сети

Распределительная сеть 35 кВ, присоединённая к питающей сети 110 кВ через трансформатор 110/35 кВ, исследована в двух вариантах (рис. 1):

а) двухобмоточный трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда с заземлённой нейтралью/звезда с изолированной нейтралью или заземлённой через ДГР» ( $Y_g/Y_n$ );

б) трёхобмоточный трансформатор со схемой соединения обмоток «звезда с заземлённой нейтралью/звезда с изолированной нейтралью или заземлённой через ДГР/треугольник» ( $Y_g/Y_n/\Delta$ ).

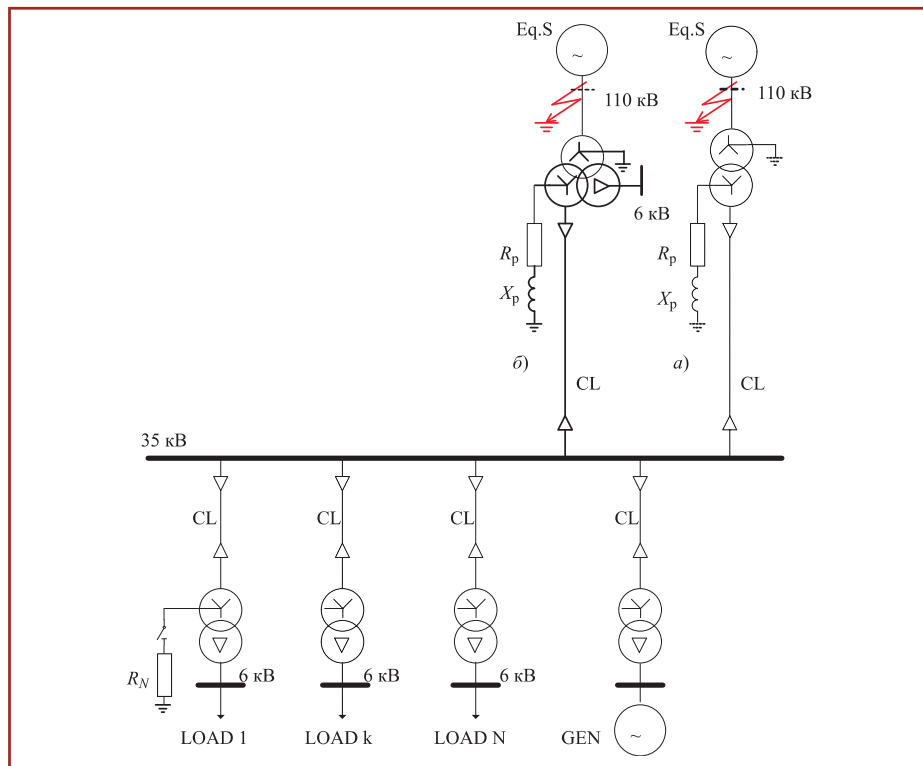


Рис. 1. Однолинейная схема сети 110 – 35 кВ:

а — с двухобмоточным трансформатором 110/35 кВ; б — с трёхобмоточным трансформатором 110/35/10 кВ.

К шинам 35 кВ подключены фидерные кабельные линии (КЛ) к трансформаторам 35/6 кВ с обмотками, соединёнными по схеме  $Y_n/\Delta$ . Нейтрали трансформаторов со стороны 35 кВ могут быть изолированы от земли или заземлены через резистор.

При исследовании электромагнитных процессов, протекающих в сети 35 кВ при КЗ в сети 110 кВ, применяли программные комплексы EMTP-RV<sup>1</sup> и MAES [3]. Поскольку в программе EMTP-RV отсутствует элемент схемы «Трёхобмоточный трансформатор» с выведенными нейтралями на среднем напряжении ( $Y_g/Y_n/\Delta$ ) [в наборе элементов EMTP-RV представлен только «Трёхобмоточный трансформатор» с глухозаземлёнными нейтралями ( $Y_g/Y_g/\Delta$ )], использовали программу MAES. Для одинаковых расчётных схем с двухобмоточными трансформаторами результаты вычисления программ EMTP-RV и MAES — одинаковы.

Основные электрические параметры компонентов реальной промышленной сети, являющейся объектом исследования, приведены в Приложении.

#### Моделирование

Рассмотрим схему сети с компенсированной нейтралью, в случае, когда схема нулевой последовательности — резонансная. Представим эквивалентную схему замещения нулевой последовательности сети 110 – 35 кВ (рис. 2), где использованы обозначения:  $\dot{Z}_{jT1}$  ( $j = 1, 2, 3$ ) — импедансы обмоток трансформатора 110/35/6 ( $j = 1$  — обмотки высшего напряжения, соединённые по схеме «звезда» с короткозамкнутой нейтралью;  $j = 2$  — обмотки среднего напряжения, соединённые по схеме «звезда» с подключением к нейтралю  $\dot{Z}_{NT1}$ ;  $j = 3$  — обмотки низшего напряжения, соединённые в «треугольник»);  $\dot{Z}_{jT2}$  ( $j = 1, 2$ ) — импедансы обмоток трансформатора 35/6 ( $j = 1$  —

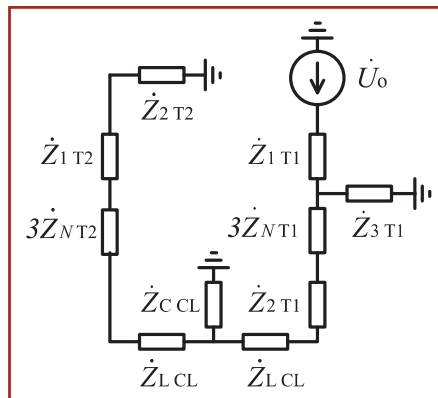


Рис. 2. Схема замещения нулевой последовательности электрической сети 110 – 35 кВ

обмотки напряжения 35 кВ, соединённые в «звезду» с подключением к нейтралю  $\dot{Z}_{NT1}$ ;  $j = 2$  — обмотки напряжения 6 кВ, соединённые в «треугольник»);  $\dot{Z}_{LCL}$ ,  $\dot{Z}_{CL}$  — импедансы кабельных линий;  $\dot{U}_0$  — напряжение нулевой последовательности.

Анализ схемы рис. 2 позволяет сделать предварительные заключения. Видно, что при изолированной нейтралю трансформатора  $T_1$  ( $|\dot{Z}_{NT1}| \rightarrow \infty$ ) нижняя часть схемы изолируется от действия напряжения  $\dot{U}_0$ , поэтому при любом способе заземления трансформатора  $T_2$ , в том числе при заземлении через ДГР, резонансных явлений в сети 35 кВ не будет при КЗ на стороне 110 кВ. Импеданс  $\dot{Z}_{3T1}$  третьей обмотки трансформатора  $T_1$  действует как шунт для резонансного контура (при этом токи нулевой последовательности протекают по обмоткам, не выходя за их пределы), поэтому чем больше будет  $|\dot{Z}_{3T1}|$ , тем меньше он будет демпфировать резонансные напряжения в контуре. Отсюда следует отличие явлений в сети 35 кВ, протекающих при использовании двухобмоточного трансформатора 110/35, от явлений, происходящих при применении трёхобмоточного транс-

форматора 110/35/6: резонансные явления в сети при использовании двухобмоточного трансформатора будут выражены более существенно.

Рассмотрим вариант связи сети 35 кВ с сетью 110 кВ посредством двухобмоточного трансформатора с соединённым обмоток  $Y_g/Y_n$ . Проведём расчёты для максимально упрощённой схемы, затем покажем тенденции к изменению результатов, связанных с усложнением схемы.

В качестве упрощённой будем рассматривать схему с однофазным КЗ в сети 110 кВ, в которой к шинам 35 кВ присоединены два фидера: один через трансформатор 110/35 запитывает рассматриваемую распределительную сеть, другой через трансформатор 35/6 присоединяет нагрузку. Сеть 35 кВ работает с резонансно заземлённой нейтралью, в связи с чем нейтраль трансформатора 35/6 изолирована от земли, нейтраль трансформатора 110/35 со стороны 35 кВ соединена с ДГР.

Для полной компенсации ёмкостного тока индуктивность ДГР должна соответствовать величине [2]:

$$X_{pb0} = \frac{1}{3b_{0c}}, \quad (1)$$

где  $b_{0c}$  — суммарная ёмкостная проводимость КЛ нулевой последовательности.

Проведём расчёт частотных характеристик сети 35 кВ при включении чисто реактивного ДГР с индуктивностью  $X_{pb0} = 433,32$  Ом, рассчитанной по (1) в соответствии с данными параметров КЛ (табл. А3). Результаты расчётов приведены на рис. 3 (кривая 1).

Поскольку в сети имеются активные и индуктивные сопротивления, то значение  $X_{pb0}$ , рассчитанное по (1), точно резонансному значению при  $f = 50$  Гц не соответствует. Корректирование  $X_{pb0}$  для попадания в резонанс можно провести по формуле:

$$X_{p50} = X_{pb0} \left( \frac{f_{b0}}{f_{50}} \right)^2. \quad (2)$$

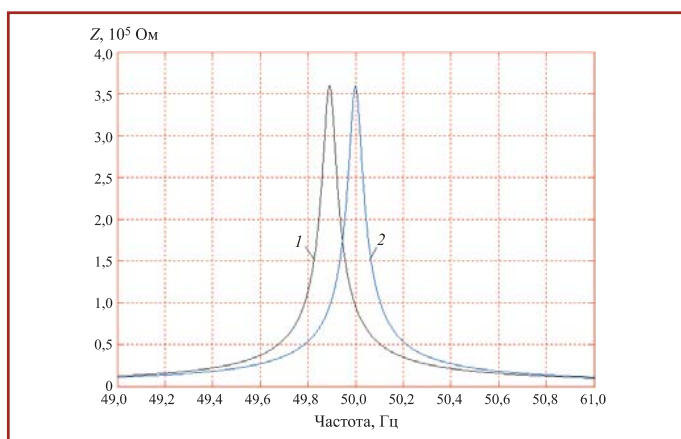


Рис. 3. Входное сопротивление компенсированной цепи 35 кВ

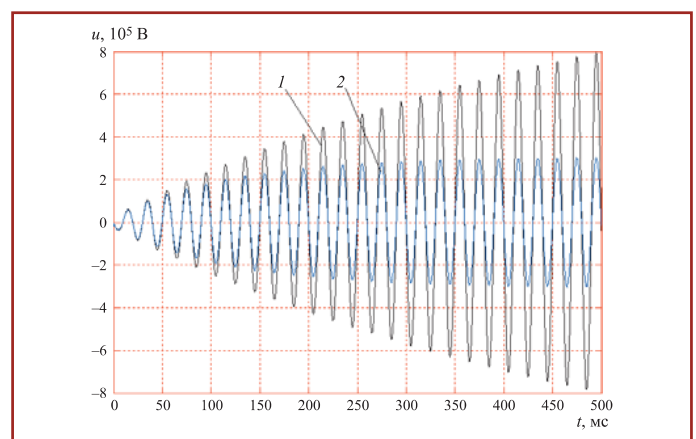


Рис. 4. Результаты расчёта напряжения на шинах 35 кВ при  $X_p = 431,43$  Ом:

1 — при  $R_p = 4$  Ом; 2 — при  $R_p = 22$  Ом

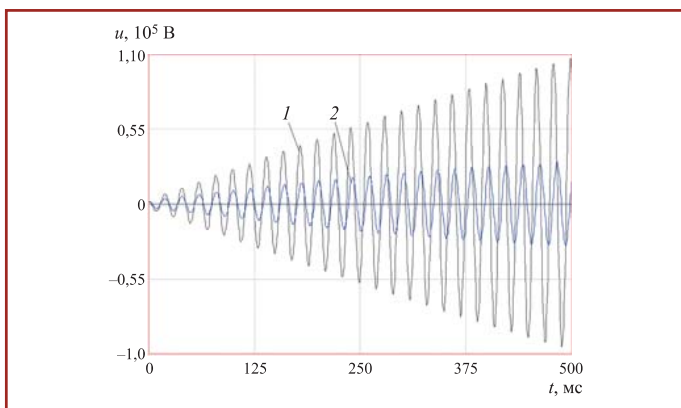


Рис. 5. Результаты расчёта напряжения на шинах 35 кВ при  $X_p = 431,43 \text{ Ом}$ ,  $R_p = 0 \text{ Ом}$ :

1 — для двухобмоточного трансформатора 110/35 кВ; 2 — для трёхобмоточного трансформатора 110/35/6 кВ

Частотная характеристика сети при включении только реактивного ДГР со скорректированной индуктивностью  $X_{p50} = 431,43 \text{ Ом}$  представлена на рис. 3 (кривая 2).

Активное сопротивление обмотки ДГР можно оценить, так как известно, что типичная добротность ДГР находится в диапазоне  $X_p/R_p = 20 \div 100$ , откуда  $R_p = 4 \div 22 \text{ Ом}$ .

Напряжение на шинах 35 кВ при подключённом к нейтрали ДГР с индуктивностью  $X_p = 431,43 \text{ Ом}$  и активными сопротивлениями  $R_p = 4 \text{ Ом}$ ,  $R_p = 22 \text{ Ом}$  представлено на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что рассчитанное резонансное перенапряжение даже при  $R_p = 22 \text{ Ом}$  представляет неприемлемую величину (коэффициент перенапряжения равен 5,27 отн. ед.).

При практической реализации режима компенсированной нейтрали допускается компенсация ёмкостного тока с избыточной компенсацией (ток — индуктивный,  $X_p = 0,95X_{p50}$ ) и с недостаточной компенсацией (ток — ёмкостный,  $X_p = 1,05X_{p50}$ ). Расчёт показал, что при  $R_p = 22 \text{ Ом}$  в обоих случаях коэффициент перенапряжений примерно равен 4,2 отн. ед.

Рассмотрим более сложную схему электрической сети с большим количеством присоединённых фидеров с нагрузками. По формуле (1) для пяти фидеров получаем  $X_{p50} = 168,23 \text{ Ом}$ , после корректирования по (2)  $X_{p50} = 166,48 \text{ Ом}$  (изменение в пределах 1 %). Разница в значениях напряжения на шинах 35 кВ в резонансных схемах с одним и пятью фидерами (в обоих случаях  $R_p = X_{p50}/20 \text{ Ом}$ ) оказалась в пределах 1,1 %. При расчёте с условием  $R_p = X_{p50}/100 \text{ Ом}$  разница возрастает до 5 % (для схемы с пятью фидерами значения напряжения меньше), что также можно оценить малой величиной. Таким образом, усложнение схемы, связанное с увеличением количества подключённых фидеров, практически не оказывает влияния на величину резонансного перенапряжения.

Представим результаты расчёта резонансных перенапряжений в сети 35 кВ при использовании в схеме трёхобмоточного трансформатора 110/35/6 кВ (рис. 1, вариант б). На рис. 5 показаны полученные расчётным путём осциллограммы напряжения на шинах 35 кВ при использовании двухобмоточного трансформатора 110/35 кВ и трёхобмоточного трансформатора 110/35/6 кВ при параметрах ДГР  $X_p = 431,43 \text{ Ом}$ ;  $R_p = 0 \text{ Ом}$ .

Как и предполагали при анализе схемы рис. 2 третья обмотка трансформатора 110 кВ оказывает демпфирующее воздействие на напряжения шин 35 кВ. Однако характер резонансных перенапряжений (рост до значительных величин) третья обмотка трансформатора не изменяет.

При учёте активных потерь в обмотке ДГР ( $R_p = 4 \div 22 \text{ Ом}$ ) напряжения на шинах 35 кВ снижаются (рис. 6). На рис. 6 представлены рассчитанные напряжения на шинах 35 кВ при использовании трёхобмоточного трансформатора в вариантах высокодобротного ДГР,  $R_p = 4 \text{ Ом}$  (осциллограмма 2, коэффициент перенапряжений — 3,7 отн. ед.) и низкодобротного ДГР,  $R_p = 22 \text{ Ом}$  (осциллограмма 3, коэффициент перенапряжений — 1,7 отн. ед.). Для сравнения приведена осциллограмма 1, полученная в условиях применения двухобмоточного трансформатора и ДГР,  $R_p = 22 \text{ Ом}$  (см. рис. 6).

Таким образом, в диапазоне рассмотренных сетевых параметров, установленных трансформаторов и ДГР возможны неприемлемые резонансные повышения напряжения на шинах 35 кВ в условиях однофазного КЗ в питающей сети 110 кВ.

#### Резистивное заземление нейтрали

В недалеком прошлом российские сети 35 кВ практически все эксплуатировались в режимах изолированных от земли или компенсированных нейтралей. Однако в настоящее время в распределительных сетях существует тенденция перевода сетей в режим резистивного заземления нейтрали. Во многом такой перевод вызван массовым внедрением кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ).

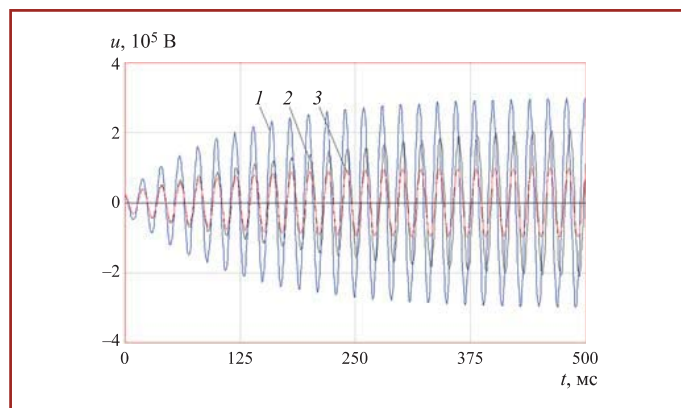


Рис. 6. Результаты расчёта напряжения на шинах 35 кВ при  $X_p = 431,43 \text{ Ом}$ :

1 — для двухобмоточного трансформатора 110/35 кВ,  $R_p = 22 \text{ Ом}$ ; 2 — для трёхобмоточного трансформатора 110/35/6 кВ,  $R_p = 4 \text{ Ом}$ ; 3 — для трёхобмоточного трансформатора 110/35/6 кВ,  $R_p = 22 \text{ Ом}$

В сетях с изолированной нейтралью с воздушными линиями электропередачи однофазное замыкание на землю (ОЗЗ) могло держаться **без отключения** линии длительное время до выезда ремонтной бригады к месту замыкания и его устранения. Работа линии электропередачи при ОЗЗ без отключения создавала условия для высокой надёжности обеспечения электроэнергией потребителя.

В кабелях с изоляцией из СПЭ однофазное замыкание приводит к прожиганию изоляции и переводу в режим КЗ (двухфазного, а затем трёхфазного). Поэтому кабели с изоляцией из СПЭ при ОЗЗ необходимо незамедлительно отключать действием релейной защиты. Селективность работы релейной защиты существенно увеличивается при резистивном заземлении нейтрали, так как активный ток от резисторов протекает исключительно в присоединении с однофазным повреждением.

Также немаловажную роль в смене режима заземления нейтрали играет новая концепция развития интеллектуальных электрических сетей (Smart Grid). Принципы Smart Grid подразумевают минимизацию потерь электрической энергии для потребителей, чему соответствует режим резистивного заземления нейтрали [4].

В целях исключения резонансных перенапряжений предлагается к нейтрали некоторых трансформаторов 35/6 кВ подключать низкоомные резисторы. При отсутствии трансформаторов 35/6 кВ с нейтральными выводами необходимо на шины 35 кВ подключать резисторы через фильтры нулевой последовательности (трансформаторы без вторичной обмотки со схемой соединения «зигзаг» — Z).

На рис. 7 приведены рассчитанные напряжения на шинах 35 кВ при  $X_p = 431,43 \text{ Ом}$ ,  $R_p = 4 \text{ Ом}$  для двухобмоточного трансформатора 110/35 кВ (кривая 1) и для трёхобмоточного трансформатора 110/35/6 кВ (кривая 2), но с заземлением нейтрали трансформатора 35/6 через активное сопротивление  $R_N = 100 \text{ Ом}$ .



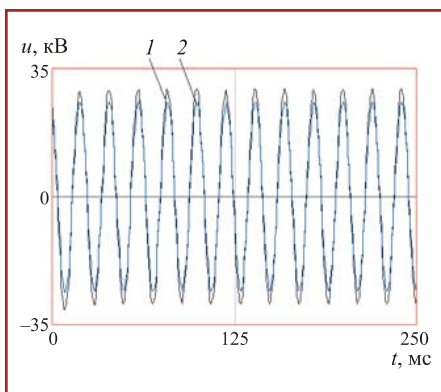


Рис. 7. Результаты расчёта напряжения на шинах 35 кВ при  $X_p = 431,43 \text{ Ом}$ ,  $R_p = 4 \text{ Ом}$  с изменением нейтрали трансформатора 35/6 через активное сопротивление  $R_N = 100 \text{ Ом}$ :

1 — для двухобмоточного трансформатора 110/35 кВ; 2 — для трёхобмоточного трансформатора 110/35/6 кВ

Как видно из рис. 7 для любого варианта использованных трансформаторов наличие активного сопротивления в контуре нулевой последовательности сети 35 кВ позволяет эффективно демпфировать резонансные перенапряжения, чего нельзя добиться простым увеличением активного сопротивления ДГР. Действие резисторов на демпфирование резонансных перенапряжений оценивается как дополнительный положительный фактор к вышеперечисленным достоинствам сетей с резистивно заземлёнными нейтралью.

### Выводы

1. При однофазных КЗ в питающей сети 110 кВ на стороне шин 35 кВ, подключённых через трансформатор 110/35 кВ со схемой соединения обмоток  $Y_g/Y_n$  или трансформатор 110/35/6 кВ со схемой соединения  $Y_g/Y_n/\Delta$ , в условиях компенсации ёмкостных токов дугогасительными реакторами возникают опасные для оборотования подстанции резонансные перенапряжения.

2. В целях исключения возникновения резонансных перенапряжений практической рекомендацией является требование тщательно просчитывать режимы компенсированной нейтрали в распределительных сетях 35 кВ с учётом аварийных режимов как в самой сети 35 кВ, так и в питающей сети 110 кВ.

3. Режим нейтрали с низкоомным резистивным заземлением в сети 35 кВ наряду с ограничением перенапряжений при дуговых, коммутационных и феррорезонансных перенапряжениях, позволяет задемпфировать резонансные перенапряжения, возникающие при однофазных КЗ в питающей сети 110 кВ, а также даёт возможность селективно выявить повреждённое присоединение и организовать его автоматическое отключение.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Willheim R., Waters M. Neutral grounding in high voltage transmission. Elsevier, New York, 1956.
2. Перенапряжения в сетях 6 – 35 кВ / Ф. А. Гиндуллин, В. Г. Гольдштейн, А. А. Дульзон, Ф. Х. Халилов. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 192 с.
3. Multipurpose power system simulator: implementation based on modern principles

/ I. Naumkin, M. Balabin, N. Lavrushenko, R. Naumkin. International Conference on Power Systems Transients (IPST2009). Kyoto, Japan, June 3 – 6, 2009.

4. Control of resistive neutral grounding based on the smart grid principles / E. Ryzhkova; S. Tsyruk; Yu. Matiunina. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIAM). 16 – 19 May 2017. St. Petersburg, Russia.

### ПРИЛОЖЕНИЕ

1. **Параметры эквивалентной системы 110 кВ.** Параметры определяются по значениям токов КЗ. При известных токах однофазного  $I^{(1)}$  и трёхфазного  $I^{(3)}$  КЗ на шинах расчёт индуктивных сопротивлений системы при известных токах подпитки от эквивалентной системы при однофазном  $I^{(1)}$  и трёхфазном  $I^{(3)}$  КЗ проводится по формулам:

$$X_{15} = \frac{U_{ph}}{I^{(35)}} = \frac{63,5 \text{ кВ}}{6,3 \text{ кА}} = 10 \text{ Ом}; \quad (\text{A.1})$$

$$X_{05} = X_{15} \frac{3 - 2 \frac{I^{(1)}}{I^{(3)}}}{3 \frac{I^{(15)}}{I^{(3)}} - 2 \frac{I^{(1)}}{I^{(3)}}} = 10 \cdot \frac{3 - 2 \cdot \frac{25}{30}}{3 \cdot \frac{4,9}{6,3} - 2 \cdot \frac{25}{30}} = 20 \text{ Ом} \quad (\text{A.2})$$

где  $X_{15}$ ,  $X_{05}$  — индуктивные сопротивления прямой и нулевой последовательности эквивалентной электрической системы 110 кВ;  $U_{ph}$  — фазное значение напряжения на шинах.

2. **Параметры трансформаторов.** Параметры вычисляли по формулам: для двухобмоточных трансформаторов:

$$U_{\phi}^j = \begin{cases} U^j, & \text{при соединении обмоток в «треугольник»;} \\ U^j / \sqrt{3}, & \text{при соединении обмоток в «звезду»;} \end{cases}$$

$$S_{\phi} = S_{\text{ном}} / 3; u_k^B = u_k^H = u_k / 2; P_k^B = P_k^H = P_k / 2; \quad (\text{A.3})$$

$$L_j = \frac{1}{n} \frac{u_k^j (U_{\phi}^j)^2}{100 S_{\phi} \omega}; R_j = \frac{1}{n} \frac{P_k^j (U_{\phi}^j)^2}{10^3 (S_{\phi})^2};$$

$$j = B, H.$$

где  $S_{\text{ном}}$  — номинальная мощность трансформатора, МВА;  $U^B, U^H$  — рабочие напряжения обмоток высшего (В) и низшего (Н) напряжения, кВ;  $u_k$  — напряжение КЗ, %;  $P_k$  — активные потери КЗ, кВт;  $n$  — число однотипных, параллельных трансформаторов;  $\omega$  — синхронная частота, 1/с;

для трёхобмоточных трансформаторов:

$$\begin{cases} U^j, & \text{при соединении обмоток в «треугольник»;} \\ U^j / \sqrt{3}, & \text{при соединении обмоток в «звезду»;} \end{cases}$$

$$S_{\phi} = S_{\text{ном}} / 3; P_k^{BH} = P_k^{CH} = 0,8 P_k^{BC};$$

$$u_k^B = 0,5(u_k^{BC} + u_k^{BH} - u_k^{CH}); P_k^B = 0,5(P_k^{BC} + P_k^{BH} - P_k^{CH});$$

$$u_k^C = 0,5(u_k^{BC} + u_k^{CH} - u_k^{BH}); P_k^C = 0,5(P_k^{BC} + P_k^{CH} - P_k^{BH});$$

$$u_k^H = 0,5(u_k^{BH} + u_k^{CH} - u_k^{BC}); P_k^H = 0,5(P_k^{BH} + P_k^{CH} - P_k^{BC});$$

$$L_j = \frac{1}{n} \frac{u_k^j (U_{\phi}^j)^2}{100 S_{\phi} \omega}; R_j = \frac{1}{n} \frac{P_k^j (U_{\phi}^j)^2}{10^3 (S_{\phi})^2};$$

$$j = B, C, H,$$

где использованы однотипные обозначения, как и в (A.3),  $U^C$  — рабочее напряжение обмотки среднего напряжения, кВ;  $u_k^{BC}, u_k^{BH}, u_k^{CH}$  — напряжения КЗ обмоток ВС (высшего – среднего напряжения), ВН (высшего – низшего напряжения), СН (среднего – низшего напряжения), %;  $P_k^{BC}$  — активные потери КЗ обмоток ВС, кВт.

Вычисленные значения параметров двухобмоточных трансформаторов приведены в табл. А1.

Таблица А 1

$S_{\text{ном}}, \text{ МВА}$	$U_B, \text{ кВ}$	$U_H, \text{ кВ}$	$u_k, \%$	$P_k, \text{ кВт}$	$L_B, \text{ Гн}$	$R_B, \text{ Ом}$	$L_H, \text{ Гн}$	$R_H, \text{ Ом}$
63	115	38,5	10,5	245	0,035	1,22	0,004	0,14
40	36,75	10,5	11,5	170	0,0062	0,215	0,0005	0,018
25	36,75	6,3	9,5	115	0,0082	0,373	0,00024	0,011

Вычисленные значения параметров трёхобмоточных трансформаторов приведены далее.

$S_{\text{ном}}$ , МВА	63	$u_{кВ}$ , %	10,5	$P_{кН}$ , кВт	93	$L_{Н}$ , Гн	0,0004
$U_{В}$ , кВ	115	$u_{кС}$ , %	0	$L_{В}$ , Гн	0,0702	$R_{Н}$ , Ом	0,0085
$U_{С}$ , кВ	38,5	$u_{кН}$ , %	6,5	$R_{В}$ , Ом	1,55		
$U_{Н}$ , кВ	11	$P_{кВ}$ , кВт	155	$L_{С}$ , Гн	0		
$P_{кВС}$ , кВт	310	$P_{кС}$ , кВт	155	$R_{С}$ , Ом	0,174		

### 3. Параметры кабельных линий

В табл. А2 приведены параметры кабельных линий при равенстве параметров прямой и нулевой последовательности.

Последовательность	Длина, км	$R$ , Ом/км	$X$ , Ом/км	$b$ , мкСим/км
0	3,71	0,100	0,187	81,681
1	3,71	0,100	0,187	81,681
0	4,24	0,0464	0,172	109,956
1	4,24	0,0464	0,172	109,956



А. И. Ширковец



А. А. Лаптева

## Аналитическая оценка опасности и защита от феррорезонансных процессов в распределительной сети 6 – 10 кВ промышленного предприятия

**ШИРКОВЕЦ А. И.**, канд. техн. наук

ООО «Болид»; 630015, г. Новосибирск, Электrozаводская ул., 2, корп. 6  
nio\_bolid@mail.ru

**ЛАПТЕВА А. А.**, Новосибирский государственный технический университет

630073, Новосибирск, просп. Карла Маркса, 20, корп. 2  
aytalina14@mail.ru

Выполнена инженерная оценка опасности возникновения явления группового феррорезонанса в зависимости от значения ёмкостного тока и числа электромагнитных трансформаторов напряжения применительно к кабельным сетям 6 – 10 кВ крупного промышленного предприятия металлургической отрасли. В программном комплексе Matlab Simulink на основе зарегистрированных в натурном эксперименте параметров замыканий на землю (осциллограмм) разработана математическая модель для расчёта переходных процессов с учётом известных характеристик намагничивания установленных трансформаторов напряжения. Выявлены опасные с точки зрения развития устойчивого или неустойчивого феррорезонанса участки сети. Рассмотрены основные меры подавления феррорезонанса, основанные на изменении конструкции трансформаторов напряжения и оптимизации схемных решений с дополнительным демпфированием. Определены требуемые значения активного сопротивления, включаемого в нейтраль, для эффективного решения поставленной задачи.

**Ключевые слова:** замыкание на землю, групповой феррорезонанс, трансформаторы напряжения, перенапряжение, математическое моделирование.

**П**ричина возникновения феррорезонансных процессов (ФРП) в электрических сетях — возникновение несимметрии в контуре нулевой последовательности, что вызывает появление напряжения смещения нейтрали. В результате возмущения фазная ёмкость относительно земли получает избыточ-

ный заряд, который после исчезновения несимметрии стекает через заземлённые обмотки высшего напряжения всех трансформаторов напряжения (ТН), включённых в схему. В сети с изолированной нейтралью это единственный путь стекания избыточного заряда. В зависимости от начальных условий, соот-

ношения ёмкости сети на землю и индуктивности ТН, т. е. положения «рабочей точки» на его кривой намагничивания, процесс разряда может быть либо затухающим, либо незатухающим. В первом случае происходит неустойчивый ФРП, во втором — устойчивый.

В электрических сетях среднего напряжения с малыми ёмкостными токами однофазного замыкания на землю (ОЗЗ), эксплуатируемых в режиме изолированной нейтрали, в ряде случаев создаются условия возникновения ФРП с протеканием сверхтоков в первичных обмотках ТН. Однако возникновение ФРП не исключено и в сетях 6 – 10 кВ с большим током ОЗЗ при значительном количестве ТН электромагнитного типа с заземлёнными первичными обмотками. Условия возбуждения ФРП определяются в зависимости от текущего значения ёмкостного тока, числа и типов измерительных трансформаторов напряжения в электрически связанной сети и режима заземления нейтрали.

Основные причины возникновения феррорезонансных перенапряжений в сетях 6 – 10 кВ — отключение ОЗЗ, перемежающиеся дуговые замыкания на землю, коммутации холостых шин ёмкостью примерно до 100 нФ с появлением «ложной земли» [1 – 4].

### Повреждение трансформаторов напряжения

К одной из основных причин повреждения ТН относятся броски тока намагничивания в первичных обмотках ТН, что особенно характерно для процесса перемежающегося дугового ОЗЗ. Установлено, что такие токи возникают при ФРП, наиболее часто имеющем частоту субгармоник  $50n$  ( $n = 1/2, 1/3, \dots$ ). Действующее значение этих токов значительно превышает максимально допустимое по тепловой устойчивости изоляции обмотки значение в 0,12 – 0,20 А для трансформаторов напряжения 6 – 10 кВ [2].

Устойчивые ФРП, сопровождающиеся бросками токов в первичных обмотках ТН, могут приводить к каскадному повреждению ТН. Вследствие высоких уровней токов в первичных обмотках ТН происходит нарушение тепловой стойкости обмоток высшего напряжения и лавинообразный пробой по внутренней витковой изоляции с перекрытием основной изоляции ТН. В ряде случаев наблюдается разлом литой изоляции ТН (рис. 1). Переход дефектов в стадию быстрого развития с представленным характерным повреждением литой изоляции ТН вызван сильной разрядной активностью в местах неплотного прилегания литого корпуса к изолированной обмотке высшего напряжения. Технологически достичь устранения локализованных воздушных полостей в этих местах крайне сложно, а испытания ТН