

## РЕЗИСТИВНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ НЕЙТРАЛИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6-35 кВ

Л.И. Евминов, Т.В. Алферова

Гомельский государственный технический университет имени  
П.О. Сухого

*Аннотация. Выбор режима заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ является важным вопросом при проектировании, эксплуатации и реконструкции электрических распределительных сетей, определяющий бесперебойность электроснабжения потребителей, безопасность персонала и электрооборудования при однофазном замыкании на землю (ОЗЗ), перенапряжения на неповрежденных фазах при ОЗЗ, ток в месте повреждения при ОЗЗ, принцип построения релейной защиты от замыканий на землю, уровень изоляции электрооборудования, допустимое сопротивление контура заземления подстанции. Режим заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ влияет на значительное число технических решений, которые реализуются в конкретной сети. В работе рассмотрена проблема выбора режима заземления нейтрали в распределительных сетях напряжением 6-35 кВ. Показано, что применение в сетях напряжением 6-35 кВ резисторов заземления нейтрали позволяет существенно повысить надежность работы сетей, снизить аварийность при однофазных замыканиях на землю и автоматизировать процесс поиска поврежденного фидера. Приведен пример расчёта величины сопротивления резистора для подстанции НПС. Экспериментально на модели показана эффективность применения резистивного заземления нейтрали на подстанции НПС. Установлено, что при изменении параметров системы электроснабжения при отключении или включении новых фидеров для сохранения величины кратности перенапряжений на принятом или заданном уровне необходимо изменять величины сопротивления резистора на значение изменения тока замыкания на землю.*

*Ключевые слова: распределительные сети 6-35 кВ, подстанция НПС, замыкание на землю, резистивное заземление нейтрали, бесперебойность электроснабжения, перенапряжения, электробезопасность, релейная защита.*

**Введение.** Выбор режима заземления нейтрали в сети 6-35 кВ является важным вопросом при проектировании, эксплуатации и реконструкции электрических распределительных сетей.

Режим заземления нейтрали в сети 6-35 кВ определяет: бесперебойность электроснабжения потребителей, безопасность персонала и электрооборудования при однофазном замыкании на землю (ОЗЗ), перенапряжения на неповрежденных фазах при ОЗЗ, ток в месте повреждения при ОЗЗ, принцип построения релейной защиты от замыканий на землю, уровень изоляции электрооборудования, допустимое сопротивление контура заземления подстанции.

Таким образом, очевидно, что режим заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ влияет на значительное число технических решений, которые реализуются в конкретной сети [4].

В мире в сетях среднего напряжения используются три возможных варианта режима работы нейтрали, а именно:

- изолированная (незаземленная) нейтраль;
- заземленная нейтраль через дугогасящий реактор;
- заземленная нейтраль через резистор.

Анализируя опыт мировой практики эксплуатации сетей среднего напряжения, видно, что в отличие от России, где используется режим изолированной нейтрали (более 80% сетей 6-35 кВ) и режим заземления через дугогасящий реактор (до 20% сетей 6-35 кВ), подавляющее число стран (Германия, Франция, Италия, Швеция, США и др.) используют нейтраль, заземленную через резистор.

В работе [5] рассмотрена методика определения показателей экономической эффективности перевода сетей электроснабжения 6-35 кВ в режим управляемого резистивного заземления.

В Республике Беларусь (РБ) до настоящего времени широкое распространение получила система изолированной нейтрали и система компенсированной через дугогасящий реактор нейтрали сетей 6-35кВ, однако в соответствии с [1,2], на вновь вводимых и реконструируемых подстанциях необходимо применять резистивное заземление нейтрали.

Целью данной работы является применение резистивного заземления нейтрали в распределительных сетях 6-35 кВ.

## **Основная часть**

### **1. Заземление нейтрали в сети 6-35 кВ через резистор**

В настоящее время с учетом опыта эксплуатации зарубежных сетей среднего напряжения признано целесообразным в РБ [1,2,3], производить модернизацию системы заземления нейтрали сетей 6-35 кВ путем заземления её через резистор, т.е. переходить на резистивную систему заземления нейтрали. Нейтрали сетей 6-35 кВ заземляются через резистор на питающих подстанциях. Резисторы для заземления нейтрали устанавливаются на каждой секции шин напряжением 6-35кВ [6,7]. На рисунке 1 приведена типовая схема

двухтрансформаторной подстанции с нейтралью на стороне 6-35кВ, заземленной через резистор.

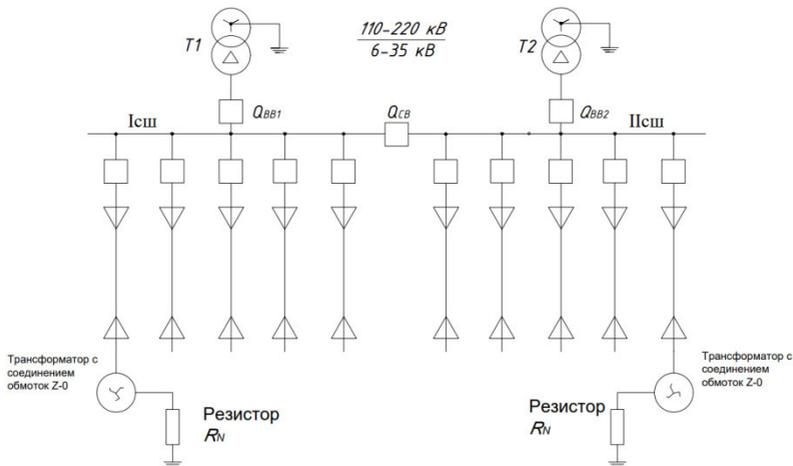


Рисунок 1- Схема понижающей подстанции с нейтралью на стороне 6-35 кВ, заземленной через резистор  $R_N$  с применением ФМЗО

При ОЗЗ в сетях с заземлённой через резистор нейтралью во всех присоединениях протекают собственные емкостные токи, однако в поврежденном присоединении, кроме суммарного емкостного тока, протекает активный ток, обусловленный включением в цепь тока нулевой последовательности активного сопротивления резистора.

Это принципиальное положение и обуславливает физическую сущность способа заземления нейтрали через резистор, который позволяет наиболее просто решить важные технологические задачи: позволяет снижать уровень дугowych, феррорезонансных и коммутационных перенапряжений. При этом появляется возможность защиты оборудования подстанции с помощью ОПН с более низким остаточным напряжением при коммутационном импульсе; представляется возможным определить повреждённое присоединение и незамедлительно принять меры по устранению этого повреждения; создаются предпосылки для выбора простой релейной защиты, действующей либо на сигнал, либо на отключение повреждённого присоединения; способствует повышению уровня электробезопасности для людей и животных в результате быстрого отключения повреждённого присоединения; позволяет обеспечивать экономическую целесообразность принимаемых мероприятий.

В этом режиме на секцию шин 6-35кВ через специально выделенную ячейку подключается трансформатор вывода нейтрали (с соединением обмоток  $Y_0/\Delta$  или Z-0), в нейтраль со стороны высшего напряжения которых включается резистор.

В соответствии с рекомендациями [3] резистивное заземление нейтрали можно разделить на две группы с позиции создаваемого активного тока при ОЗЗ:

В зависимости от соотношения сопротивлений резистора  $R_N$  и емкостного сопротивления сети  $X_C$  принято условное разделение резистивного заземления нейтрали на низкоомное и высокоомное:

- для низкоомного резистивного заземления  $R_N \leq X_C$ ;
- для высокоомного резистивного заземления  $R_N > X_C$ .

- **Низкоомное резистивное заземление нейтрали** — это заземление нейтрали через резистор, при котором суммарный ток в месте замыкания (активный ток резистора плюс емкостный ток сети) превышает 10А. Как правило, суммарный ток однофазного замыкания при этом режиме заземления нейтрали существенно превышает 10А. Обычно ток, создаваемый резистором при низкоомном резистивном заземлении нейтрали, лежит в пределах:

$$I_R = 10 \dots 200 \text{ А.}$$

Низкоомное резисторное заземление нейтрали производится [2, п.5.9.42] в случаях, когда режим однофазного замыкания на землю должен быть селективно отключен за минимально возможное время. Величина сопротивления низкоомного резистора должна выбираться из условий обеспечения селективного срабатывания защит от ОЗЗ на защищаемом присоединении. Защита также должна быть отстроена от бросков тока замыкания на землю.

Низкоомное заземление нейтрали может выполняться в сетях с любым емкостным током, при этом активный ток  $I_R$ , создаваемый резистором, также должен быть больше емкостного тока сети. Как правило, активный ток, создаваемый резистором, превышает емкостный ток сети не менее чем в 2 раза.

Низкоомное резистивное заземление нейтрали характеризуется значительным снижением уровня перенапряжений в сети и организацией простой и эффективной защиты от ОЗЗ.

Присущие режиму резистивного заземления нейтрали недостатки (увеличение тока в месте повреждения и необходимость отключения замыканий) преодолеваются за счет быстрого отключения поврежденного фидера и организации резервного питания потребителей.

**Высокоомное резистивное заземление нейтрали** — это заземление нейтрали через резистор, при котором суммарный ток в

месте замыкания (активный ток резистора плюс емкостный ток сети) не превышает 10А. Как правило, однофазное замыкание на землю при таком режиме заземления нейтрали можно не отключать и защиты от замыканий на землю действуют на сигнал. Высокоомное резистивное заземление нейтрали целесообразно применять в случаях, когда сеть должна иметь возможность длительной работы в режиме ОЗЗ до обнаружения места ОЗЗ и устранения повреждения или имеются ограничения по величине тока повреждения. При этом ток в нейтрали должен быть такой величины, чтобы исключить появление опасных негативных явлений, связанных с перенапряжениями и электробезопасностью, но быть достаточным для определения повреждённого присоединения и селективной работы релейной защиты на сигнал.

Высокоомное резистивное заземление нейтрали может выполняться только в сетях с емкостным током  $I_C$  не более 10 А: при этом активный ток  $I_R$ , создаваемый резистором, должен быть больше емкостного тока сети:

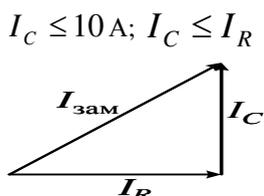


Рисунок 2- Векторная диаграмма токов при однофазном замыкании в сети с резистивным заземлением нейтрали

При высокоомном резистивном заземлении нейтрали суммарный ток в месте повреждения складывается из емкостного тока сети и активного тока, создаваемого резистором заземления нейтрали (рисунок 2):

$$I_{\text{зам}} = \sqrt{I_C^2 + I_R^2} \quad (1)$$

Указанные активный и емкостной токи суммируются векторно и сдвинуты друг относительно друга на  $90^\circ$ .

Высокоомное резистивное заземление нейтрали характеризуется снижением уровня перенапряжений в сети до допустимой величины, организацией селективной эффективной защиты от ОЗЗ с действием на сигнал и возможностью продолжительной работы сети в режиме ОЗЗ при действии защит на сигнал.

В таблице 1 перечислены преимущества и недостатки сетей с нейтралью, заземленной через резистор

Недостатками резистивного заземления нейтрали помимо указанных в таблице 1 являются дополнительные затраты на заземление нейтрали сетей 6-35 кВ через резистор:

- проектирование перехода сети на заземление нейтрали 6-35 кВ через резистор;
- приобретение специального трансформатора и резистора;
- приобретение трансформаторов тока в цепи подключения резистора и для всех отходящих линий, если отсутствует трансформатор тока нулевой последовательности;
- приобретение, монтаж камеры для подключения резистора;
- приобретение, монтаж и наладка устройств релейной защиты и автоматики.

Таблица 1 - Преимущества и недостатки сетей с нейтралью, заземленной через резистор

Преимущества		Недостатки	
Для высокоомного заземления нейтрали	Для низкоомного заземления нейтрали	Для высокоомного заземления нейтрали	Для низкоомного заземления нейтрали
<p>1. Отсутствие необходимости в немедленном отключении однофазного замыкания на землю;</p> <p>2. Возможность продолжительной работы сети в режиме ОЗЗ при действии защит на сигнал.</p> <p>3. Снижается уровень дуговых, феррорезонансных и коммутационных перенапряжений до допустимой величины;</p> <p>4. Простая реализация эффективной релейной защиты от ОЗЗ с действием на сигнал;</p> <p>5. Исключение повреждений измерительных ТН из-за феррорезонансных процессов.</p>	<p>1. Снижается уровень дуговых, феррорезонансных и коммутационных перенапряжений;</p> <p>2. Простая реализация релейной защиты;</p> <p>3. Исключение повреждений измерительных ТН из-за феррорезонансных процессов;</p> <p>4. Уменьшение вероятности поражения персонала и посторонних лиц при быстром отключении.</p>	<p>1. Незначительное увеличение тока в месте повреждения.</p>	<p>1. Увеличение тока в месте повреждения</p> <p>2. Необходимость отключения однофазных замыканий.</p> <p>3. Необходимость организации резервного питания потребителей.</p>

## 2. Расчет токов замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью

Расчет токов замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью производится для определения параметров срабатывания релейной защиты от замыканий на землю, выбора параметров элементов для резистивного заземления нейтрали.

Расчет ведется при следующих допущениях:

- учитывается лишь емкостной ток замыкания на землю;
- замыкание на землю считать металлическим, т.е.  $R_{\Gamma} = 0$ .

Приближенное значение величины емкостного тока замыкания на землю сети определяется по емкостным токам отдельных участков этой сети.

Расчет тока замыкания на землю по току замыкания воздушных и кабельных ЛЭП и двигателей можно производить по формуле:

$$I_c = \sum I_{c.кл.} \cdot L_{c.кл.} + \sum I_{c.вл.} \cdot L_{c.вл.} + \sum I_{c.дв.} \quad (2)$$

где  $I_{c.кл.}$  и  $I_{c.вл.}$  - удельные токи кабельных и воздушных линий, А/км;  $L_{c.кл.}$  и  $L_{c.вл.}$  - длина однотипных электрически связанных кабельных и воздушных ЛЭП, км;  $I_{c.дв.}$  - ток замыкания на землю двигателей, А.

Увеличение емкостного тока сети за счет емкости оборудования подстанций может ориентировочно оцениваться для воздушных и кабельных сетей 6-10 кВ – на 10%, для воздушных сетей 35 кВ – на 12%. Для сетей 35 кВ увеличение емкостного тока за счет оборудования подстанций учитывать не следует.

Недостаточная точность аналитического метода определения емкостных токов замыкания на землю реальных линий электропередачи определяет применение расчетов только для предварительной оценки параметров проектируемых сетей и уточняется прямыми их измерениями.

## 3. Условия выбора режима резистивного заземления нейтрали

Задача определения типа резистивного заземления нейтрали сети является многогранной и включает в себя следующие составляющие [3]:

1. Обеспечение электробезопасности.
2. Надежность и бесперебойность электроснабжения потребителей.
3. Снижение уровня перенапряжений в сети.
4. Организация эффективной релейной защиты от ОЗЗ.

### 3.1. Выбор величины сопротивления резистора по условию обеспечения электробезопасности

Критерий обеспечения электробезопасности заключается в соблюдении условий электробезопасности для людей при ОЗЗ на

подстанциях с учетом существующего нормирования величин допустимого сопротивления заземляющего устройства (ЗУ) или напряжения прикосновения.

На ПС 6-35 кВ, с нейтралью, заземлённой через резистор, электробезопасность обеспечивается при допустимой величине сопротивления ЗУ  $R_{ЗУ\text{доп}}$ , удовлетворяющего условию

$$R_{ЗУ\text{доп}} \leq \frac{R_{ЗУ(ПУЭ)}R_N}{\sqrt{R_N^2 + X_C^2}}, \text{ Ом} \quad (3)$$

где  $R_{ЗУ(ПУЭ)}$  – величина сопротивления ЗУ, нормируемая ПУЭ, Ом.

Из (3) следует, что по сравнению с принятой в соответствии с [1] допустимой величиной сопротивления ЗУ при заземлении нейтрали сети через резистор всегда ухудшаются условия электробезопасности. В этом случае электробезопасность обеспечивается двумя способами: либо путем выбора допустимого сопротивления ЗУ по (3), либо путем выполнения на ПС специальных защитных мероприятий, связанных с отключением поврежденного присоединения

**3.2. Условие надежности электроснабжения потребителей** определяется возможностью обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей. При необходимости сохранения работы сети в режиме ОЗЗ необходимо использовать высокоомное резистивное заземление нейтрали с действием релейной защиты от ОЗЗ на сигнал.

**3.3. Выбор величины сопротивления резистора по условию снижения уровня перенапряжений.**

Выбор величины резистора по критерию снижения уровня перенапряжений производится по требуемой степени защиты изоляции сети и электрооборудования от перенапряжений  $U_{\text{макс}}$ , которая определяется допустимым коэффициентом кратности перенапряжений  $K_{\Pi}$ .

$$K_{\Pi} = U_{\text{макс}}/U_{\phi}. \quad (4)$$

При этом коэффициент кратности перенапряжений составляет:

- для высокоомного резистивного заземления нейтрали  $K_{\Pi} = 2,2 \dots 2,6$ .

- для низкоомного резистивного заземления нейтрали  $K_{\Pi} = 1,0 \dots 2,2$ .

Сопротивление резистора по заданной кратности уровня перенапряжений  $K_{\Pi}$  определяется по выражению

$$R_N = X_C \frac{K_{\Pi} - 1}{3,4 - K_{\Pi}}, \text{ Ом}, \quad (5)$$

где величина  $X_C$  определяется по току  $I_c$ , определенному по выражению (2)

Аттестация проектируемых и действующих резисторов по критерию снижения перенапряжений производится по величине кратности перенапряжений  $K_{II}$ , которая определяется по выражению

$$K_{II} = \frac{2,4R_N}{R_N + X_C} + 1 \quad (6)$$

В качестве базовой степени защиты изоляции сети и электрооборудования от перенапряжений принимается степень защиты  $k_{II} = 2,6$ , что соответствует норме на профилактические испытания вращающихся машин (генераторов, высоковольтных двигателей и другого оборудования). Выбор степени защиты  $k_{II} > 2,6$  должен иметь соответствующее обоснование.

**3.4. Выбор величины сопротивления резистора по условию эффективной работы релейной защиты** заключается в определении необходимого вида защиты, обладающей требуемой селективностью и чувствительностью.

Защита от ОЗЗ в сети организуется на всех присоединениях. При низкоомном резистивном заземлении нейтрали в режиме ОЗЗ по поврежденному присоединению протекает ток величиной в десятки и сотни ампер и поэтому устанавливается максимальная токовая защита нулевой последовательности с действием на отключение поврежденного присоединения. При высокоомном резистивном заземлении нейтрали могут устанавливаться как простые токовые защиты, так и более сложные виды защит с действием на отключение или сигнал. Допустимое сопротивление резистора по условию эффективной работы РЗА определяется по выражению:

$$R_N \leq U_{\phi} / I_{CЗ}, \text{ Ом} \quad (7)$$

где  $I_{CЗ}$  – ток срабатывания релейной защиты от ОЗЗ, А (определяется в соответствии с рекомендациями п. 3.2).

### 3.5. Проверка термической стойкости резистора

Величина сопротивления резистора должна выбираться при условии наибольшего рабочего напряжения на шинах  $U_{н.раб}$ , которое составляет:

$U_{н.раб} = 7,2 \text{ кВ}$  – для сети напряжением 6 кВ;

$U_{н.раб} = 12 \text{ кВ}$  – для сети напряжением 10 кВ;

$U_{н.раб} = 40,5 \text{ кВ}$  – для сети напряжением 35 кВ.

Термическая стойкость низкоомного резистора оценивается по допустимому кратковременному току  $I_{Pдоп}$  и времени его протекания  $t_{Pдоп}$ , которые должны удовлетворять условиям

$$I_{Pдоп} \geq I_p, \quad t_{Pдоп} \geq t_{CЗрез}, \quad \text{но не менее } 3 \text{ с}, \quad (8)$$

Рекомендуемый номинальный ряд сопротивлений резисторов для заземления нейтрали: 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 400,

500, 800, 1000, 1250, 1500, 1800, 2000, 2500, 3000, 4000, 5000, 7000, 10000 Ом.

### **3.6. Определение мощности трансформатора присоединения резистора**

Наиболее распространенным, простым и недорогим способом включения резистора в нейтраль сети является установка специального трансформатора ТЗН со схемой соединения обмоток  $Y_0/\Delta$ -11, мощность которого выбирается по условию [8]:

$$S_T \geq \frac{U^2}{3K_{пер}R_N}, \text{кВА} \quad (9)$$

где  $K_{пер} = 1.0 \dots 1.4$  – коэффициент перегрузки трансформатора.

Проверку силового трансформатора на термическую стойкость в режиме ОЗЗ производить не требуется.

Также для включения резистора в нейтраль сети может использоваться специальный сетевой фильтр нулевой последовательности ФМЗО (рисунок 1), мощность которого выбирается по выражению (8).

### **4. Влияние на величину $K_p$ изменения параметров системы электроснабжения**

При эксплуатации системы электроснабжения 6-35 кВ возможны отключения присоединений или подключения соседней секции шин включением секционного выключателя для профилактического ремонта электрооборудования. При таких действиях существенно изменяется емкостной ток замыкания на землю и изменяется величина  $K_p$ .

Расчеты  $K_p$ , выполненные по (6) показали следующие результаты.

При снижении емкостного тока в 2 раза (отключение протяженной кабельной линии)  $K_p$  уменьшился на 16%.

При увеличении емкостного тока замыкания на землю в 2 раза (подключение соседней секции шин секционным выключателем)  $K_p$  увеличился на 11%. Зависимость величины  $K_p$  от емкостного тока при неизменном значении  $R_N$ , рассчитанному по (6), показано на рисунке 3.

Таким образом, изменение величины  $K_p$  при изменении параметров системы электроснабжения и токов замыкания на землю необходимо учитывать при расчетах параметров резистивного заземления нейтрали.

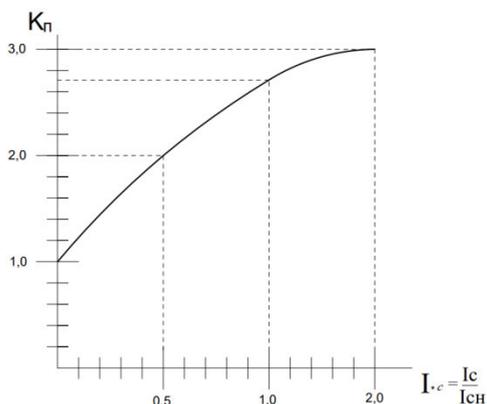


Рисунок 3 - Изменение величины  $K_p$  от емкостного тока замыкания на землю.

Для сохранения величины  $K_p$  на принятом или заданном уровне при отключении присоединений необходимо предусмотреть увеличение величины  $R_N$  на значение уменьшения тока замыкания на землю.

### 5. Пример расчета параметров резистивного заземления нейтрали для подстанции НПС

В качестве примера произведен расчет параметров резистивного заземления нейтрали для одной из секций шин подстанции НПС, которая является потребителем первой категории. К рассматриваемой секции шин подключены кабелями двигатели мощностью 2-4 МВт и потребители мощностью 100-400 кВА. Технические данные оборудования приведены на рисунке 4.

Определены емкостные токи  $I_{c1} - I_{c5}$ , протекающие через присоединения при ОЗЗ на оборудовании одной секции 6 кВ.

Результаты расчетов, произведенные по рекомендациям п.2 приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Значения емкостных токов, протекающих через присоединения ОЗЗ

Ток присоединения	$I_{c1}$	$I_{c2}$	$I_{c3}$	$I_{c4}$	$I_{c5}$
Емкостной ток двигателя, А	-	0.055	0.068	-	0.094
Емкостной ток кабеля, А	0.608	0.368	0.45	4.33	0.110
Емкостной ток $I_c$ А	0.608	0.423	0.518	4.33	0.204
Суммарный емкостной ток, А	6.08				

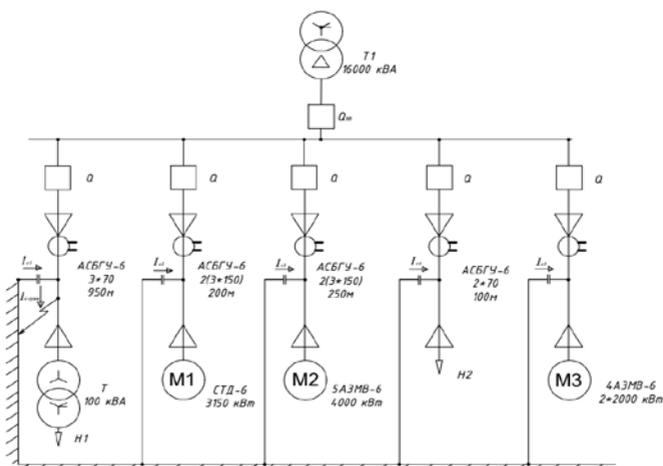


Рисунок 4 - Принципиальная схема и технические данные оборудования для одной секции шин подстанции НПС в сети 6 кВ с изолированной нейтралью

Емкостный ток сети 6кВ на секциях подстанции НПС по рекомендациям п. 2 составляет  $(6.08+0.6) = 6.68\text{A}$ , поэтому для исключения феррорезонансных явлений было использовано техническое решение по заземлению нейтрали секций 6кВ через высокоомный резистор.

**- Проверка условия обеспечения электробезопасности**

На ПС 6 кВ, с нейтралью, заземлённой через резистор электробезопасность обеспечивается при допустимой величине сопротивления ЗУ  $R_{зудоп}$ , удовлетворяющего условию (3):

$$R_{зудоп} \leq \frac{10(nуэ)2000}{\sqrt{2000^2_N + 1036^2_C}} = 8.88 \text{ Ом}$$

где  $R_{зудоп} = 10 \text{ Ом}$  – величина сопротивления заземляющего устройства, нормируемая [1 п.1.7.57].

Таким образом, условие обеспечения электробезопасности выполняется.

**- Условие надежности электроснабжения потребителей** определяется возможностью обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей.

Для потребителей первой категории при необходимости сохранения работы сети в режиме ОЗЗ необходимо использовать высокоомное резистивное заземление нейтрали с действием релейной защиты от ОЗЗ на сигнал.

**- Выбор величины сопротивления резистора по условию снижения уровня перенапряжений [9]**

Выбор величины резистора по критерию снижения уровня перенапряжений производится по требуемой степени защиты изоляции сети и электрооборудования от перенапряжений, которая определяется допустимым коэффициентом кратности перенапряжений  $K_{\Pi}$ .

Величина допустимого коэффициента кратности перенапряжений определяется оборудованием и уровнем изоляции сети.

для высокоомного резистивного заземления нейтрали  $K_{\Pi} = 2,2...2,6$ .

Емкостное сопротивление сети  $X_C$  определяется по выражению (3)

$$X_c = U_{сф} / I_c = 3640 / 6.68 = 545 \text{ Ом};$$

где  $U_{сф}$  и  $I_c$  – фазное напряжение, В, и емкостной ток сети, А.

Сопротивление резистора по заданной кратности уровня перенапряжений  $K_{\Pi}$  определяется по выражению (5)

$$R_N = 545 \frac{2.6 - 1}{3.4 - 2.6} = 1090 \text{ Ом},$$

Применяем резистор для заземления нейтрали типа NER-1250.

Аттестация проектируемых и действующих резисторов по критерию снижения перенапряжений производится по величине кратности перенапряжений  $K_{\Pi}$ , которая определяется по выражению (6):

$$K_{\Pi} = \frac{2.4 \cdot 1250}{1250 + 545} + 1 = 2,67$$

В качестве базовой степени защиты изоляции сети и электрооборудования от перенапряжений принимается степень защиты  $K_{\Pi} = 2,6$ , соответствующая норме на профилактические испытания вращающихся машин (высоковольтных двигателей).

При резистивном заземлении нейтрали степень защиты изоляции сети и электрооборудования от перенапряжений должна соответствовать условию  $K_{\Pi} = 2,6$ .

Проведенные эксперименты после заземления нейтрали на секциях 6 кВ подстанции через резисторы NER-1250 (активное сопротивление 1250 Ом) повреждения трансформаторов напряжения прекратились. Проведенный в сети 6кВ НПС эксперимент показал, что после исчезновения однофазного замыкания на землю

феррорезонансный процесс в сети с резистивным заземлением нейтрали не возникает.

### **- Выбор величины сопротивления резистора по условию эффективной работы релейной защиты**

При высокоомном резистивном заземлении нейтрали определение поврежденного присоединения производится по наличию активной составляющей тока ОЗЗ, которая имеет достаточно малую величину, что в свою очередь ведет к усложнению и удорожанию релейной защиты от ОЗЗ. При высокоомном резистивном заземлении нейтрали могут устанавливаться как простые токовые защиты, так и более сложные виды защит с действием на отключение или сигнал.

Ток срабатывания релейной защиты от ОЗЗ должен удовлетворять условию

$$I_{CЗ} \leq U\phi/R_N, O_M$$

где  $I_{CЗ}$  – ток срабатывания релейной защиты от ОЗЗ, А

### **- Проверка термической стойкости резистора**

Величина сопротивления резистора должна выбираться при условии наибольшего рабочего напряжения на шинах  $U_{н.раб}$ , которое составляет:

$$U_{н.раб} = 7,2 \text{ кВ} \text{ – для сети напряжением } 6 \text{ кВ};$$

Термическая стойкость низкоомного резистора оценивается по допустимому кратковременному току  $I_{Pдоп}$  и времени его протекания  $t_{Pдоп}$ , которые должны удовлетворять условиям

$$t_{Pдоп} \geq \frac{I_{Pдоп} \geq I_p}{t_{CЗрез}}, \text{ нВ не менее } 3 \text{ с,}$$

### **- Определение мощности трансформатора присоединения резистора**

Наиболее распространенным способом включения резистора в нейтраль сети является установка специального трансформатора ТЗН со схемой соединения обмоток  $Y_0/\Delta$ -11, мощность которого выбирается по условию (9):

$$S_T \geq \frac{6,3^2}{3 \cdot 1,4 \cdot R_N}, = 4,72 \text{ кВА}$$

где  $K_{пер} = 1,0 \dots 1,4$  – коэффициент перегрузки трансформатора.

### **Выводы.**

1. Применение резистивного режима заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ нашло широкое применение в мировой практике, так как имеет значительные преимущества по сравнению с изолированной и компенсированной нейтралью.

2. Применение в сетях 6-35 кВ резисторов заземления нейтрали позволяет существенно повысить надежность работы сетей,

автоматизировать процесс поиска поврежденного фидера и снизить аварийность при однофазных замыканиях на землю.

3. Необходимо учитывать снижение коэффициента степени защиты от перенапряжений при отключении части отходящих линий для правильной работы защит от замыканий на землю, автоматизированного поиска поврежденного фидера и последствий от возникновения однофазных замыканий на землю.

4. Для сохранения величины кратности перенапряжений на принятом или заданном уровне при отключении присоединений необходимо предусмотреть увеличения величины сопротивления резистора на значение уменьшения тока замыкания на землю.

### **Список использованных источников**

1. Правила устройства электроустановок, издание шестое, переработанное и дополненное, -Мн.; Дизайн ПРО, 2007, -703 с.

2. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей, ТКП 181-2009 (02230), Минэнерго, -Минск, 325 с.

3. СТП 09110.20187.09\_55, Методические указания по заземлению нейтралей сетей 6-35 кВ– МН. Белэнергосетьпроект -2009

4. Короткевич М.А., Повышение надежности электрических сетей при внедрении современной техники. – Международная научно-техническая конференция «Перенапряжения и надежность эксплуатации электрооборудования», Выпуск 3, Минск, 2004.

5. Рыжкова Е.Н., Кудрин Б.И., Фомин М.А. Экономическая эффективность перевода сетей электроснабжения 6-35 кВ в режим управляемого резистивного заземления - Вестник МЭИ, №3, 2013.

6. Куликова Н.А., Титоренко О.Н., Тяпкина В.А. Резистивное заземление нейтрали – способ повышения надежности работы электрических сетей 6-35 кВ – Энергетические установки и технологии, 2018, т.4, №2.

7. Кадомская К.П., Виштибеев А.Б. О резистивном заземлении нейтрали в сетях 6-35 кВ различного назначения. – Доклады научно-технической конференции "Режимы заземления нейтрали сетей 3-6-10-35 кВ". Новосибирск, 2000.

8. Короткевич М.А., Окраменко А.Ю. Выбор мощности заземляющего трансформатора для подключения в нейтраль сети напряжением 10 кВ высокоомного резистора. – Труды третьей Всероссийской научно-технической конференции «Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6-35 кВ», Новосибирск, 2004г.

9. Ильных М.В., Сарин Л.Н., Челазнов А.А. Основные положения по выбору номиналов резисторов для заземления нейтралей сетей 6-35 кВ. – Труды третьей Всероссийской научно-

*NEUTRAL RESISTIVE EARTHING IN 6-35 kV DISTRIBUTION NETWORKS*

*Evminov L. I., Alferova T.V.*

*Abstract. The choice of neutral grounding mode in 6-35 kV networks is an important issue in the design, operation and reconstruction of electrical distribution networks, which determines the uninterrupted supply of consumers, the safety of personnel and electrical equipment during a single-phase earth fault (SPEF), and overvoltage in undamaged phases during SPEF, current at the place of damage during SPEF, the principle of building relay protection against earth faults, insulation level of electrical equipment, permissible ground loop resistance of the substation. The neutral grounding mode in 6-35 kV networks affects a significant number of technical solutions that are implemented in a particular network. The paper considers the problem of selecting the neutral grounding mode in distribution networks with a voltage of 6-35 kV. It is shown that the use of neutral grounding resistors in networks with a voltage of 6-35 kV can significantly improve the reliability of networks, reduce the accident rate during single-phase earth faults and automate the process of finding a damaged feeder. An example of calculating the resistance value of a resistor for an NPS substation is given. Experimentally, the model shows the effectiveness of using resistive neutral grounding at an NPS substation. It has been established that when changing the parameters of the power supply system when turning off or on new feeders in order to maintain the magnitude of the overvoltage ratio at an accepted or predetermined level, it is necessary to change the resistance value of the resistor by the value of the change in earth fault current.*

*Key words: distribution networks 6-35 kV, substation, short circuit to ground, resistive earth neutral, uninterrupted power supply, overvoltage, electrical safety, relay protection.*

*Alferova T.V. Ph.D., Associate Professor, alferowa.tam@yandex.ru, Republic of Belarus, Gomel, Gomel Sukhoi State Technical University*

*Evminov L. I., Ph.D., Associate Professor, Republic of Belarus, Gomel, Gomel Sukhoi State Technical University*