

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАЗЕМЛЕНИЯ РЕЖИМА НЕЙТРАЛИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 6-35 КВ И ВЛИЯНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКУ ИЗОЛЯЦИИ

Рассматриваются гипотезы перенапряжений при дугowych замыканиях на землю и влияние режимов заземления нейтрали электрических сетей на характеристику изоляции.

Ключевые слова: электрические сети, электроустановки, замыкание, электроснабжения, релейная защита, генератор.

EFFICIENCY OF GROUNDING OF NEUTRAL MODE OF DISTRIBUTION NETWORKS WITH VOLTAGE OF 6-35 KV AND INFLUENCE ON INSULATION CHARACTERISTIC

The hypothesis of overvoltage in arc faults to ground and the influence of neutral grounding modes of electrical networks on the insulation characteristic are considered.

Key words: electric networks, electrical installations, short-circuit, power supply, relay protection, generator.

Одной из ключевых проблем в электрических распределительных сетях напряжением 6-35 кВ является способ заземления нейтрали, поскольку он оказывает решающее влияние на надежность электроснабжения потребителей, сохранность электрических машин и кабелей, безопасность людей и животных, находящихся в местах прохождения линий, и в очень большой степени, на выбор принципов и типов устройств релейной защитой и автоматики.

В соответствии с Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) работа электрических сетей напряжением 6-35 кВ должна предусматриваться с изолированной или заземленной через дугогасящий реактор (ДГР) нейтралью. Компенсация емкостного тока замыкания на землю должна применяться при значениях этого тока в сетях напряжением 6-20 кВ, имеющих железобетонные и металлические опоры на воздушных линиях электропередачи, и во всех сетях напряжением 35 кВ- более 10А; в сетях, не имеющих железобетонных и металлических опор на воздушных линиях, при напряжении 6 кВ- более 30А; при напряжении 10 кВ- более 20А; при напряжении 15-20 кВ - более 15А в схемах напряжением 6-20 кВ блоков генератор-трансформатор (на генераторном напряжении) более 5А.

При токах замыкания на землю более 50А рекомендуется применение не менее двух заземляющих ДГР.

Уже более 80 лет, начиная с 1916 г, дискутируются вопросы выбора режима заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ, предлагаются новые устройства защиты (сигнализации), системы автоматической компенсации емкостных токов, позволяющие быстро и достоверно определить поврежденную линию или электрическую машину при возникновении однофазных замыканий на землю (ОЗЗ).

На различных конференциях и семинарах сталкиваются различные мнения ученых и практиков, рассматривается опыт эксплуатации электрических сетей 6-35кВ, странах СНГ и дальнего зарубежье по этой актуальной теме. Однако и в настоящее время данный вопрос не разработан и до конца остается актуальным.

Однофазное замыкание на землю в линиях 6-35кВ в зоне контакта проводника с землей часто возникает дуга. Аварийный процесс характеризуется рядом следующих друг за другом повторных

зажиганий и погасаний электрической дуги и, как вследствие возникновения перенапряжений в месте повреждения.

Наиболее значительными являются четыре гипотезы, выдвинутые В. Петерсеном, Петерсом Слепяном, Н. Беляковым, Д. Апышевым и К. Сатаркуловым.

По гипотезе Петерсена (1916г) погасание дуги происходит при прохождении через нуль высокочастотных колебаний и новом ее зажигании при максимуме напряжений на поврежденной фазе. При этом цикл погасаний и зажигания повторяется каждый полупериод рабочей частоты сети, а максимальные напряжения на фазах постоянно возрастают, достигают через несколько периодов своих максимумов. По данной гипотезе предельные кратности перенапряжений на фазах В и С, возрастая от одного зажигания к другому теоретически при отсутствии демпфирующих факторов, при неограниченном числе повторных зажигания и погасаний дуги достигают значений $K_B=K_C \leq 7,5$ $K_A \leq 6$ [1].

По гипотезе Петерса и Слепяна (1923г.) дуга гаснет при прохождении через нуль составляющей тока рабочей частоты и зажигается вновь через полупериод этой частоты, т.е. цикл повторяется каждый период. Наибольшее кратности перенапряжения достигают значений $K_B=K_C \leq 3,5$ $K_A \leq 2$.

По гипотезе Белякова (1957г.), которая занимает промежуточное положение между первыми двумя, максимальные перенапряжения ($4U_{\text{фм}}$) возникнут при совпадении двух условий:

Первое зажигание должно произойти раньше максимуме э.д.с. поврежденной фазы амплитуда последнего типа тока было бы критической;

второе зажигание дуги должно произойти при напряжении поврежденной фазы, равном $2,2 U_{\text{ф}}$.

По многочисленным данным, в воздушных сетях с изолированной нейтралью предельные зарегистрированные значения кратности перенапряжений при дуговых замыканиях на землю находятся на уровне 3,5 а в кабельных сетях около 4,2, причем перенапряжения с кратностью $K \geq 4$ чрезвычайно редки и возникают с вероятностью, равной 0,0001 [2].

В работе [3] предлагается новая гипотеза (1995г.) перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в высоковольтных сетях с изолированной нейтралью, где рассматриваемая задача сводится к проблеме устойчивости нелинейных колебаний связанных контуров. Таким образом, ни одна из выше перечисленных гипотез на практике пока не подтверждается.

При перекрытии изоляции, например, фазы А (рис. 1.1), напряжение на неповрежденных фазах относительно земли, как следует из векторной диаграммы (рис. 1.2), повышается в $\sqrt{3}$ раз:

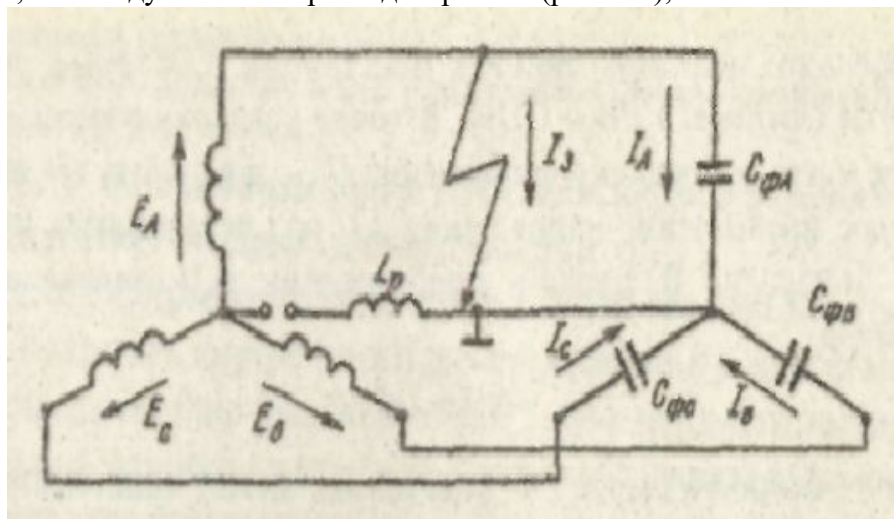


Рис. 1.1. Эквивалентная схема определения перенапряжений, возникающих при замыканиях на землю в сетях с изолированной нейтралью.

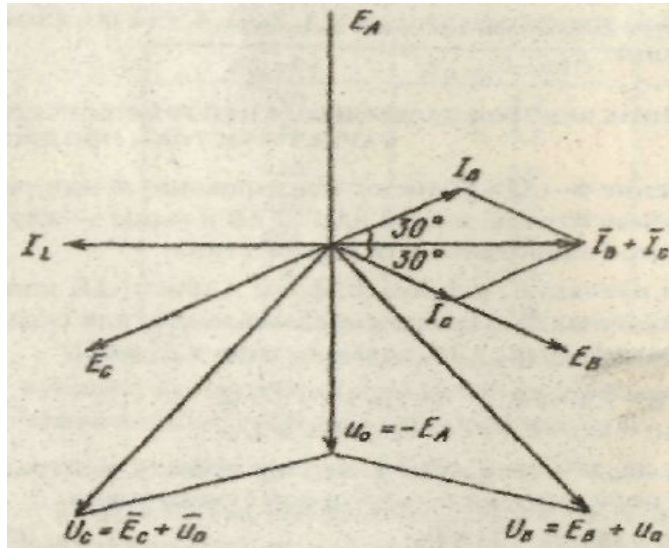


Рис. 1.2. Векторная диаграмма токов и напряжений при замыканиях одной фазы на землю в сетях с изолированной нейтралью.

$$\begin{aligned}
 U_B &= E_B - E_A; & |U_B| &= \sqrt{3}U_\phi; \\
 U_C &= E_C - E_A; & |U_C| &= \sqrt{3}U_\phi;
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

Ток замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью (цепь разомкнута) определяется из векторной суммы токов

$$I_A + I_B + I_C + I_3 = 0 \tag{1.2}$$

Без учета падения напряжений на дуге $U_A \approx 0$ и $I_A \approx 0$:

$$I_B = -(I_B + I_C) = -(U_B j \omega C_B + U_C j \omega C_C)$$

При равенстве емкостей фаз В и С ($C_{фВ} \approx C_{фС}$) в соответствии с рис. 1.1 и формулой (1.1) имеем

$$|I_3| = 3\omega C_\phi U_\phi$$

Величина тока I_3 существенно влияет на дальнейшее развитие процесса. Электрическая прочность изоляционных конструкций и воздушных промежутков выбирается обычно с трех-, четырех- кратным запасом по отношению к амплитуде фазного напряжения.

При малых токах (единицы ампер) дуга в промежутке гаснет в момент перехода тока через нулевое значение и восстанавливается нормальный режим работы сети.

Более высокие значения I_3 приводят к повышению ионизации и более медленному восстановлению электрической прочности промежутка вследствие остаточной проводимости воздуха или твердого диэлектрика. Становятся возможными повторные зажигания дуги. Последняя растягивается под действием электродинамических сил и тепловых потоков воздуха и в конце концов гаснет. Однако возрастает вероятность ее негашения, перебрасывания на соседние фазы и возникновения двухфазных и трехфазных КЗ. Если величина I_3 превышает некоторое критическое значение $I_{зк}$; то преобладает случай негашения дуги (необходимо переходить к заземлению нейтрали через дугогасящие реакторы).

Компенсация токов замыкания на землю $I_3 \geq I_{зк}$ в сетях на напряжение 6 и 10кВ осуществляется путем заземления нейтрали через индуктивность дугогасящего реактора L_p (см. рис. 1.1).

В симметричной трехфазной сети напряжение в нейтрали близко к нулю. При замыкании на землю одной фазы (например, А) напряжение U_A становится равным по величине и обратным по знаку ЭДС аварийной фазы (см. рис.1.2). Под действием этого напряжения в дугогасящем реакторе

течет ток $I_L =$

Вместо соотношения (1.2) имеем: $I_A + I_B + I_C + I_L = 0$.

Принимая $I_A \approx 0$ и $I_3 \approx 0$, получаем условие компенсации реактивных составляющих токов $I_B + I_C$ и I_L :

$$\omega L_p = \frac{1}{3\omega C_\phi}. \quad (1.3)$$

Практически с помощью дугогасящего реактора удается снизить ток однофазного замыкания на землю на один-два порядка. Остаточный ток в месте замыкания на землю обуславливают:

- неточная компенсация реактивной составляющей тока по формуле (1.3);

- активные составляющие токов через сопротивление R_p реактора $I_{pa} = \frac{U_\phi R_p}{(\omega L_p)^2}$ и через утечки G по изоляции фазных проводов $3U_\phi G$;

- высшие гармонические составляющие токов через емкости.

Существенно уменьшается также и скорость восстановления напряжения на изоляции после прохождения остаточного тока через нуль. В результате электрическая прочность изоляции восстанавливается быстрее, чем приложенное к ней напряжение (дуга гаснет).

При глухом заземлении нейтрали токи в месте КЗ могут достигать десятки килоампер. Действующее значение периодической составляющей токов КЗ в начальный момент определяется по формулам:

трехфазное КЗ в одной точке

$$I_{K3}^{(3)} = \frac{E_\phi}{Z_{1\phi}}$$

двухфазное КЗ

$$I_{K3}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}E_\phi}{(Z_{1\phi} + Z_{2\phi})}$$

двухфазное КЗ на землю в одной точке

$$I_{K3}^{(1,1)} = \frac{\sqrt{3}E_\phi}{(Z_{1\phi} + Z_{2\phi} * Z_{0\phi} / Z_{2\phi} + Z_{0\phi})}$$

однофазное КЗ

$$I_{K3}^{(1)} = \frac{3E_\phi}{(Z_{1\phi} + Z_{2\phi} + Z_{0\phi})}$$

где E_ϕ - ЭДС прямой последовательности эквивалентного генератора, полученная после преобразования схемы сети к простейшей эквивалентной схеме; $Z_{1\phi}$, $Z_{2\phi}$, $Z_{0\phi}$ - эквивалентные сверхпереходные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей сети относительно точки КЗ.

В основном $Z_{2\phi} \approx Z_{1\phi}$, поэтому желательно, чтобы $Z_{0\phi}$ не превышало $Z_{1\phi}$, а так как для выбора коммутационной аппаратуры и определения электродинамических усилий, расчетным является случай трехфазного КЗ. Такое условие может быть обеспечено при искусственном увеличении $Z_{0\phi}$. Для этого на мощных подстанциях в ряде случаев приходится разземлять часть нейтралей трансформаторов и оставлять один трансформатор с глухозаземленной нейтралью. Однако увеличение $Z_{0\phi}$ приводит к дополнительному повышению напряжения на здоровых фазах при несимметричных КЗ. Наибольшие перенапряжения промышленной частоты чаще возникают на одной из фаз против точки КЗ на аварийной фазе.

Если пренебречь активными потерями в сети, то $Z_{1\phi} \approx X_{1\phi}$; $Z_{2\phi} \approx X_{2\phi}$; $Z_{0\phi} \approx X_{0\phi}$. Если $X_{1\phi} \approx X_{2\phi}$; $X_{0\phi} \approx aX_{1\phi}$,

для коэффициента замыкания на землю имеем:

Однофазное КЗ

$$K_1 = \frac{|U_{1\phi}|}{E_3} = \frac{\sqrt{3(a^2 + a + 1)}}{2 + a},$$

Двухфазное КЗ на землю

$$K_2 = \frac{|U_{2\phi}|}{E_3} = \frac{3a}{1 + 2a}.$$

Анализ выражений для K_1 и K_2 показывает, что при изменении a от 0 до ∞ коэффициент K_1

будет варьировать от $\frac{\sqrt{3}}{2}$ до $\sqrt{3}$, а K_2 – от 0 до $\frac{\sqrt{3}}{2}$. В частности, в сетях с эффективно заземленной нейтралью ($a \leq 3$) $K_1 = 1,25$, $K_2 = 1,29$.

Из сказанного следует, что при выборе изоляции электрооборудования за расчетное напряжение с частотой 50 Гц необходимо принимать:

- наибольшее линейное напряжение сети для электрооборудования предназначенного для работы в сетях с изолированной или резонансно-заземленной нейтралью;
- напряжение около $1,3U_{\phi}$ для оборудования в сетях с эффективно заземленной нейтралью;
- напряжение порядка $1,4U_{\phi}$ для вентильных разрядников и ОПН.

Выводы

1. Основное требование, предъявляемое к электроснабжению – это надежная бесперебойная работа. Поэтому вопросы выбора режима нейтрали сетей 6-35 кВ требуют серьезных дальнейших теоретических исследований по уточнению предложенных гипотез.

2. Необходимо упорядочить и конкретизировать основные требования к регулируемым реакторам, проведя исследования влияния активной составляющей и высших гармонических тока реактора на процесс компенсации в нормальном режиме и в режиме замыкания на землю.

3. необходимы дальнейшие специальные исследования по вопросу автоматизации защиты от ОЗЗ, дальнейшая разработка конструкций регулируемых ДГР и создание специальных автоматических регуляторов.

Литература:

1. Борисов В.Н., Халилов Ф.Х. Изоляция электрооборудования электрических станций и подстанций. М: МЭИ, 1992-164с.
2. Халилов Ф.Х., Мешков В.Н. Внутренние перенапряжения в сетях 6-35кВ Л: Наука, 1986-145с.
3. Апышев Д.А. и др. /Аналитический метод исследования дуговых перенапряжений от однофазных замыканий на землю 6-35 кВ токи КЗ в энергосистемах/. Тезисы докладов всероссийской научной конференции. М.: РАО ЕЭС России, 1995- с 67-69.
4. Вильгейм Р., Уотерс М. Заземление нейтрали высоковольтных системах М. Госэнергоиздат, 1959, -416с.
5. Джанузаков Т.Н., Орунбаев А.А. Экспериментальная установка исследования переходных процессов при ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью. /Современное состояние и проблемы развития электроэнергетики Кыргызской Республики. Бишкек, 1997- с.72-75.