

УДК 621.316.72

**ЗАВИСИМОСТЬ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ОТ
ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ВИДА
НЕЙТРАЛЕЙ****DEPENDENCE OF THE ENERGY SYSTEM'S STABILITY ON CHANGES
IN TRANSFORMER PARAMETERS AND THE TYPE OF NEUTRAL LINE**

И.В. Прилуцкий, В.А. Паус

Научный руководитель – А.Л. Старжинский, к.т.н., доцент
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

I. Prilutsky, V. Paus

Supervisor – A. Starzhinsky, Candidate of Technical Sciences
Belarusian national technical university, Minsk

Аннотация: В данной работе представлена зависимость устойчивости энергосистемы от параметров трансформаторов и вида нейтралей.

Abstract: This paper presents the dependence of the power system's stability on the parameters of transformers and the type of neutral.

Ключевые слова: нейтраль, устойчивость, напряжение, параметры, энергосистема.

Keywords: neutral, stability, voltage, parameters, power system.

Введение

Устойчивость энергосистемы важная составляющая энергетики, она обеспечивается путём укрепления электрических связей, поддержанием оптимального режима по напряжению и реактивной мощности, применением быстродействующей автоматики: АРВ, релейной защиты, АПВ, УШР. Кроме всего вышеперечисленного устойчивость зависит от параметров трансформаторов.

Основная часть

Существуют следующие виды нейтралей:

- изолированная нейтраль;
- резонансно заземленная нейтраль;
- эффективно-заземлённая нейтраль.

Изолированная нейтраль представляет собой точку трансформатора, которая соединена с землёй или соединена через приборы сигнализации.

Она применима в сетях напряжением 6-35 кВ небольшой протяжённости, воздушные линии до 10-20 км и кабельные 5-10 км, с малыми ёмкостными токами, не превышающими 5-10 А.

При однофазном замыкании на землю (ОЗЗ) формула будет иметь следующий вид:

$$I_3 = \sqrt{3} \cdot U_{\phi} \cdot \omega \cdot C_0, \quad (1)$$

где I_3 – ток однофазного заземления на землю, А;
 U_{ϕ} – фазное напряжение сети, кВ;

ω – угловая частота, рад/с;

C_0 – ёмкость фазы относительно земли, Ф.

Упрощённый расчёт для воздушной линии:

$$I_c = \frac{U_{\text{ном}} \cdot L}{350}, \quad (2)$$

где $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение, кВ;

L – протяжённость линии электропередачи, км.

Упрощённый расчёт для кабельной линии:

$$I_c = \frac{U_{\text{ном}} \cdot L}{10}. \quad (3)$$

При металлическом ОЗЗ на одной фазе потенциал становится равным нулю, в следствие чего векторы напряжений двух других фаз смещаются. Полученное напряжение относительно землю будет равно линейному значению:

$$U_{\text{неповр. фазы}} = \sqrt{3} \cdot U_{\phi} = U_L, \quad (4)$$

где $U_{\text{неповр. фазы}}$ – напряжение в неповреждённой фазе, кВ;

U_L – линейное напряжение, кВ.

Резонансно заземлённая нейтраль представляет собой нейтраль заземлённую через дугогасящий реактор, подобранный так, чтобы индуктивный ток был равен ёмкостному току сети. Обычно применяется в сетях крупных городов или промышленных предприятий, напряжением 6-35 кВ, обладающих ёмкостным током, порядка 10 А.

Формул компенсации тока ОЗЗ имеет следующий вид:

$$I_3 = I_c - I_L, \quad (5)$$

где I_c – ёмкостной ток, А;

I_L – индуктивный ток, А.

Дугогасящий реактор настраивается в резонанс, чтобы он эффективно противостоял остаточному току в месте замыкания. В следствии малых значений токов, дуга не может поддерживаться в устойчивом состоянии. Исходя из этого, она гаснет и не может вновь зажечься, так как энергия, запасённая в ёмкости, поглощается реактором. Новые модели дугогасящих ректоров обладают возможностью переключения ответвлений для подстройки.

Допустимая расстройка нормируется в пределах $\pm 5\%$. Она описывается следующим выражением:

$$\vartheta = \frac{I_c - I_L}{I_c}. \quad (6)$$

В электрических сетях с изолированной нейтралью режим работы электрических машин практически не нарушается при возникновении однофазного замыкания. Это объясняется тем, что сопротивление нулевой последовательности в такой конфигурации стремится к бесконечности, что предотвращает протекание значительных токов повреждения.

Эффективно-заземлённая нейтраль – это нейтральная точка трансформатора, соединённая с землёй без промежуточных элементов. Данная

схема заземления преимущественно используется в сетях на 110 кВ и выше. В данном случае ток однофазного короткого замыкания велик, так как ограничивается в основном активным сопротивлением цепи. Также при однофазном коротком замыкании напряжение неповреждённых фаз относительно земли не превышает 80% от линейного напряжения [1].

Реактивное сопротивление силовых трансформаторов выступает важным фактором, оказывающим непосредственное воздействие на устойчивость энергосистемы [2].

Минимизация реактивного сопротивления трансформаторов способствует расширению пропускной способности линий электропередачи, обеспечивая выполнение требований как статической, так и динамической устойчивости системы. Однако уменьшение реактивного сопротивления влечёт за собой повышение стоимости трансформатора, что связано с техническими трудностями данного процесса. Влияние на статическую устойчивость будет выражаться следующим образом:

$$\frac{\partial P}{\partial \delta} = P_{max} \cos(\delta_0 - \alpha) = P_{max} \cos(\arcsin(\frac{P_0}{P_{max}})) = \sqrt{P_{max}^2 - P_0^2} \quad (7)$$

Запас устойчивости по мощности:

$$K_3 = \frac{P_{max} - P_0}{P_0} \times 100\% \quad (8)$$

Так как P_{max} уменьшается с ростом реактивного сопротивления, то и запас устойчивости уменьшается.

Далее рассмотрим влияние на динамическую устойчивость с помощью метода площадей. Площадь ускорения:

$$A_{уск} = \int_{\delta_{откл}}^{\delta_{откл}} (P_T - P_e^{авар}(\delta)) d\delta \quad (9)$$

Если из-за увеличения реактивного сопротивления характеристика $P_e^{авар}(\delta)$ снижается, то разность $(P_T - P_e^{авар}(\delta))$ увеличивается, что приводит к увеличению площади ускорения.

Площадь торможения:

$$A_{торм} = \int_{\delta_{откл}}^{\delta_{кр}} (P_e^{после}(\delta) - P_T) d\delta. \quad (10)$$

Если из-за увеличения реактивного сопротивления характеристика $P_e^{после}(\delta)$ снижается, то разность $(P_e^{после}(\delta) - P_T)$ уменьшается, что приводит к уменьшению площади торможения.

Получается, что с ростом реактивного сопротивления динамическая устойчивость падает (рисунок 4).

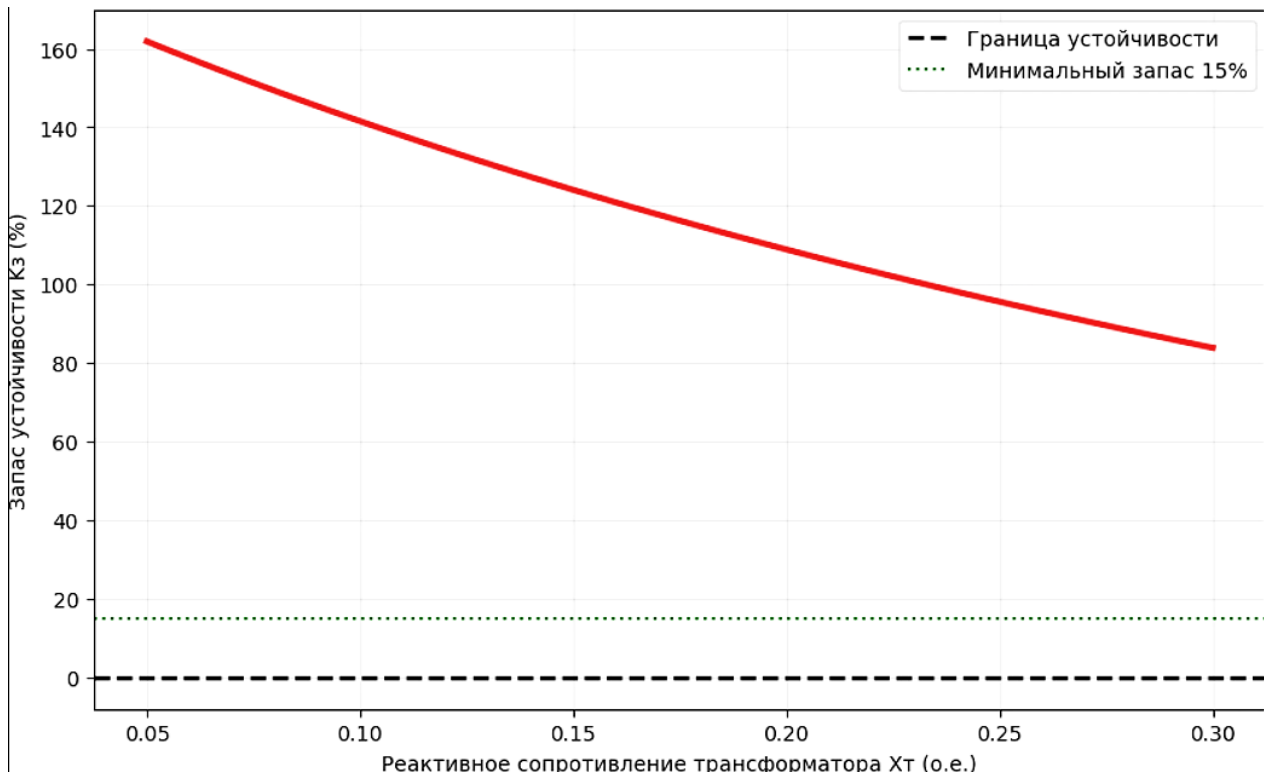


Рисунок 4 – Влияние реактивного сопротивления трансформатора на устойчивость

В числе технических решений, направленных на повышение устойчивости энергосистем, особое место занимает резистивное заземление нейтрали трансформаторов. Ключевое преимущество данного подхода заключается в том, что при правильно подобранном малом сопротивлении, не приводящем к существенному росту напряжения нейтрали, сохраняются штатные условия эксплуатации изоляции, при этом значительно возрастает устойчивость к несимметричным коротким замыканиям.

Если в нормальном режиме максимальная передаваемая мощность составляет:

$$P_m^I = \frac{EU}{x_{12}^I} \quad (11)$$

То при аварии без заземления нейтрали:

$$P_m^{III} = \frac{EU}{x_{12}^{III}} \quad (12)$$

где:

$$x_{12}^{III} = \frac{x_a + x_b + x_a x_b}{x_\Delta} \quad (13)$$

где:

$$x_\Delta = x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma} \quad (14)$$

Если нейтраль будет заземлена через сопротивление R_{T0} :

$$P^{III} = E^2 y_{11}^{III} \sin a_{11}^{III} + E y_{12}^{III} \sin(\delta_{12} - a_{12}^{III}), \quad (15)$$

где y_{11}^{III} и y_{12}^{III} – проводимости, содержащие активное сопротивление R_0 .

Анализ характеристик P^I , P^{II} , P^{III} , построенных по методу площадей, показывает, что система, теряющая устойчивость при однофазном коротком замыкании с глухо заземлённой нейтралью, может сохранить стабильность при переходе к резистивному заземлению с оптимально подобранными параметрами. Введение активного сопротивления в нейтраль оказывает стабилизирующий эффект, проявляющийся в увеличении амплитуды характеристики P_m^{III} .

При значении $R_0 = R_1$, обеспечивающем сближение характеристик P^{III} и P^{II} , запас устойчивости системы демонстрирует независимость от времени действия аварии. В этом состоянии он приближается к значению, наблюдаемому при безаварийном отключении цепи.

В рабочем диапазоне $R_0 > R_1$ характеристика P^{III} занимает более высокое положение относительно P^{II} , обеспечивая меньшее падение мощности при коротком замыкании. Оценка по методу площадей показывает: система демонстрирует лучшую устойчивость при продолжительных замыканиях. Эта особенность действует до $R_0 = R_2$, после чего усиление резистивной составляющей через уменьшение y_{11} снижает амплитуду характеристики P^{III} и устойчивость системы.

При достижении условия $R_0 = R_3$ наблюдается возврат характеристики P^{III} в зону значений, близких к P^{II} . Аналогично режиму $R_0 = R_1$, данная характеристика становится инвариантной к длительности короткого замыкания. Дальнейший рост сопротивления в нейтрали изначально приводит к снижению запаса устойчивости. Однако при переходе к значительным величинам сопротивления, которые можно считать аналогом изолированной нейтрали, устойчивость системы вновь улучшается, а её поведение асимптотически приближается к режиму с незаземлённой нейтралью.

Использование активного сопротивления в нейтрали трансформатора демонстрирует положительное влияние на устойчивость системы не только при однофазных, но и при двухфазных замыканиях на землю, хотя во втором случае эффект выражен существенно слабее. Для двухфазных коротких замыканий оптимальная величина активного сопротивления оказывается выше, чем та, которая требуется для однофазных коротких замыканий. Что касается реактивного заземления, то его применение, как правило, демонстрирует меньшую результативность по сравнению с активным аналогом.

Заключение

Реактивное сопротивление выступает ключевым фактором, определяющим стабильность работы энергосистемы: его рост ведёт к снижению устойчивости, и наоборот. Следовательно, выбор в пользу трансформаторов с пониженным реактивным сопротивлением, хотя и является технически предпочтительным, упирается в вопрос экономической целесообразности из-за высокой стоимости таких решений.

Оптимальное резистивное заземление нейтралей силовых трансформаторов, является хорошим способом для повышения устойчивости энергосистемы.

Литература

1. Виды нейтралей в электрических сетях [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.panpwr.ru/expert/tpost/mznt81o0z1-vidi-neitranei-v-elektricheskikh-setyah>. – Дата доступа: 04.11.2025.
2. Основные характеристики трансформатора [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://electricalschool.info/spravochnik/maschiny/1916-osnovnye-kharakteristiki-transformatora.html>. – Дата доступа: 04.11.2025.