

СНИЖЕНИЕ РИСКОВ РАЗВИТИЯ АВАРИЙ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЯХ

В.В. Вахнина, А.А. Кувшинов, В.А. Кузнецов

По результатам анализа влияния конфигурации систем электроснабжения на распределение геоиндуцированных токов (ГИТ) выявлены силовые трансформаторы, наиболее подверженные воздействию ГИТ, которые необходимо защищать в первую очередь при геомагнитных бурях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГЕОМАГНИТНЫЕ БУРИ, ГЕОИНДУЦИРОВАННЫЕ ТОКИ, СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ, ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что при геомагнитных бурях (ГМБ) возмущения геомагнитного поля индуцируют на поверхности земли электрические поля длительностью много большей периода (0,02 с) рабочей частоты электрической сети – квазистационарные поля, в результате чего между заземлителями подстанций наводится квазипостоянная электродвижущая сила (ЭДС). В системах электроснабжения (СЭС) напряжением 110 кВ и выше с глухозаземленными нейтралью силовых трансформаторов подстанций и электростанций ЭДС создает в замкнутой цепи геоиндуцированные токи. Путь протекания ГИТ между двумя подстанциями: теллурические токи – подстанция 1 (заземлитель – нейтраль – заземленная обмотка высокого напряжения силового трансформатора Т1) – провода воздушной линии электропередачи – подстанция 2 (заземленная обмотка высокого напряжения силового трансформатора Т2 – нейтраль – заземлитель) – теллурические токи.

Основное воздействие ГИТ на СЭС заключается в насыщении магнитной системы силовых трансформаторов (СТ), что приводит к многократному возрастанию несинусоидальных токов намагничивания, которые также циркулируют по электрической сети. В результате в СЭС увеличивается потребление реактивной мощности и снижается пропускная способность электрической сети, происходит падение напряжения, появляются высшие гармонические составляющие тока и напряжения, возможны ложные срабатывания релейной за-

щиты и автоматики, и, как следствие, нарушение электроснабжения потребителей [1].

В России до настоящего времени отсутствуют рекомендации по повышению надежности функционирования систем электроснабжения при геомагнитных бурях, как, например, в документе С-15 [2], разработанного Координационным советом северо-восточной электроэнергетической системы США после геомагнитной бури 1989 г. Возникает предположение, что, как показано в [3], более половины невыясненных причин отключений воздушных линий электропередач (ЛЭП) и ложного срабатывания релейной защиты и автоматики в СЭС возможны из-за протекания геоиндуцированных токов. Однако это предположение не подтверждается актами и отчетами по технологическим нарушениям, т.к. в списке классификационных признаков, включенных в «Инструкцию по расследованию и учету технологических нарушений в работе энергосистем, электростанций, котельных, электрических и тепловых сетей» [4] и в причинах возникновения аварий «Правил расследования аварий в электроэнергетике» [5], отсутствует одна – влияние на режимы работы СЭС геоиндуцированных токов при геомагнитных бурях.

Поэтому для решения проблем снижения рисков развития аварий и нарушения электроснабжения потребителей систем электроснабжения при геомагнитных бурях необходимо обеспечить безаварийное функционирование силовых трансформаторов, подверженных наибольшему воздействию геоиндуцированных токов.

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЁТА ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В общем случае, расчет ГИТ должен проводиться в два этапа [6].

На первом («геофизическом») этапе определяется горизонтальная компонента геоэлектрического поля на поверхности земли, которая определяется вариациями геомагнитного поля, главным образом нерегулярными в период ГМБ, и геофизическими свойствами глубинных проводящих структур в окрестностях рассматриваемой электрической сети. Это самостоятельная и сложная научная задача, решение которой требует отдельного исследования. Вместе с тем, опыт наблюдений показывает, что типичные диапазоны значений напряженности и частоты геоэлектрического поля у поверхности земли составляют (1-20) В/км и (0,001-0,1) Гц соответственно [7]. Указанные параметры геоэлектрического поля используются в дальнейшем в качестве исходных данных для расчета ГИТ.

На втором («техническом») этапе с использованием законов линейных электрических цепей постоянного тока определяются собственно ГИТ, вызываемые геоэлектрическим полем в конкретной электрической сети. Схема замещения для расчета ГИТ составляется с учетом следующих допущений.

1. Физическая картина растекания ГИТ от заземлителей подстанций при частоте (0,001-0,1) Гц аналогична растеканию постоянного тока в земле. Постоянный ток растекается от заземлителей во все стороны и проникает глубоко в землю, в связи с чем, плотность постоянного тока в земле быстро убывает по мере удаления от заземлителя, примерно обратно пропорционально квадрату расстояния [8]. Такая картина распределения позволяет принимать в расчетах сопротивление земли для постоянного тока равным нулю. Поэтому при расчетах ГИТ достаточно учитывать только сопротивление растекания заземлителей, которое практически одинаково для постоянного и переменного токов и не зависит от величины тока во всем возможном диапазоне изменения.

2. Горизонтальная составляющая геоэлектрического поля у поверхности земли неизменна по величине и направлению в пределах области, занимаемой рассматриваемой электрической сетью, т.е. геоэлектрическое поле является потенциальным. Это позволяет определять разность потенциалов на поверхности земли между заземлителями двух подстанций,

связанных воздушными ЛЭП, с помощью интегрального соотношения

$$U = \int_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_l E \cdot \cos \alpha \cdot dl, \quad (1)$$

где E – вектор напряженности геоэлектрического поля; $d\mathbf{l}$ – вектор, равный по величине элементу пути dl и направленный по касательной к выбранному пути интегрирования l ; α – угол между векторами E и $d\mathbf{l}$.

Величина разности потенциалов не зависит, как следует из принятого допущения, от выбора конкретного пути интегрирования, который в частности может совпадать с трассой ЛЭП. Поскольку трасса ЛЭП состоит из прямолинейных участков, то с учетом $E = const$ целесообразно в выражении (1) заменить интегрирование на суммирование и записать [9]:

$$U = E \sum_{j=1}^j l_j \cdot \cos \alpha_j = E \cdot L_{\Sigma}, \quad (2)$$

где l_j – длина j -го участка ЛЭП; α_j – угол ориентации j -го участка ЛЭП относительно вектора напряженности геоэлектрического поля; j – количество прямолинейных участков; L_{Σ} – электрическое расстояние между подстанциями, равное сумме проекций прямолинейных участков ЛЭП на направление вектора напряженности геоэлектрического поля.

Таким образом, при составлении схемы замещения для расчета величины ГИТ в электрической сети произвольной конфигурации необходимо в первую очередь учитывать активные сопротивления заземленных обмоток высокого напряжения (ВН) силовых трансформаторов, фазных проводов ЛЭП, сопротивление растекания заземлителей и источники напряжения, равные по величине разности потенциалов между заземлителями, возникающей под действием геоэлектрического поля. В отдельных случаях, например, для определения «высокочастотных» компонент ГИТ ($f \approx 0,1-1$) Гц необходимо учитывать и активное сопротивление земли.

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ В НЕЙТРАЛЯХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТИПОВЫХ КОНФИГУРАЦИЙ

Электрическая сеть радиальной конфигурации

В общем случае электрическая сеть радиальной конфигурации напряжением 110 кВ и

выше образуется воздушными линиями электропередач ВЛ₁,...,ВЛ_п, которые связывают наиболее мощный центральный силовой трансформатор Т с периферийными силовыми трансформаторами Т₁,..., Т_п (рис. 1).

Обмотки ВН всех силовых трансформаторов имеют глухозаземленную нейтраль. В результате в электрической сети образуется «п» контуров, в которых в период геомагнитных бурь под воздействием геоэлектрического поля могут протекать геоиндуцированные токи, ограниченные только активными сопротивлениями фазных проводов ЛЭП, обмоток ВН силовых трансформаторов, заземляющих устройств и, в общем случае, земли. Упрощенная однофазная схема замещения, изображенная на рис. 2, составлена в предположении полной идентичности одноименных активных сопротивлений разных фаз рассматриваемой электрической сети.

Параметры упрощенной схемы замещения (рис. 2) определяются с помощью выражений

$$\left. \begin{aligned} r_i &= \frac{1}{3} r_{Лi} + \frac{1}{6} r_{Ti} + r_{zi} + r_{3yi}, \\ R &= \frac{1}{6} R_T + R_{3y}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $r_{Лi} = r_{0i} \cdot l_i$ – активное сопротивление фазного провода ВЛ_i; R_{3y} , r_{3yi} – сопротивление растекания заземлителей центрального Т и периферийного Т_i силовых трансформаторов; r_{Ti} – активная составляющая сопротивления короткого замыкания периферийного силового трансформатора Т_i; R_T – активная составляющая сопротивления короткого замыкания центрального силового трансформатора Т; r_{zi} – активное сопротивление грунта между заземленными нейтралью центрального Т и периферийного Т_i силовых трансформаторов; r_{0i} , l_i – активное погонное сопротивление и длина фазного провода ВЛ_i; E_i – источник постоянного напряжения, равный разности потенциалов между заземлителями центрального Т и периферийного Т_i силовых трансформаторов. Параметры источника напряжения E_i определяются выражениями (1) и (2).

Узловое напряжение UN упрощенной схемы замещения определяется величиной

$$U_N = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \cdot G_i}{\sum_{i=1}^n G_i + 1/R}, \quad (4)$$

где $G_i = 1/r_i$ – проводимость i-й ветви схемы замещения.

Величина ГИТ в глухозаземленной нейтрали периферийного силового трансформатора Т_i составит

$$I_{Ni} = \frac{E_i - U_N}{r_i}. \quad (5)$$

Величина геоиндуцированного тока в глухозаземленной нейтрали центрального силового трансформатора Т:

$$I_{N\Sigma} = I_{N1} + I_{N2} + \dots + I_{Ni} + \dots + I_{N(n-1)} + I_{Nn} = \sum_{i=1}^n I_{Ni} \quad (6)$$

Наиболее тяжелым воздействиям ГИТ подвергается центральный силовой трансформатор Т, в глухозаземленной нейтрали которого протекает суммарный ток.

Электрическая сеть магистральной конфигурации

На рис. 3 показана расчетная схема электрической сети магистральной конфигурации напряжением 110 кВ и выше с двухсторонним питанием, которая образована магистральными Т₁, Т_п и распределительными Т₂,...,Т_{п-1} силовыми трансформаторами, воздушными линиями электропередач ВЛ₁,...,ВЛ_{п-1}. Обмотки ВН всех силовых трансформаторов имеют глухозаземленную нейтраль.

На рис. 4 представлена упрощенная схема замещения для расчета ГИТ с учетом всех наиболее значимых активных сопротивлений, включая и сопротивление земли.

Сопротивления упрощенной схемы замещения (рис. 4) определяются выражениями

$$\left. \begin{aligned} R_{Лi} &= \frac{1}{3} r_{Лi}, \\ R_{Ti} &= \frac{1}{6} r_{Ti} + r_{3yi}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

а параметры источников напряжения E_i – выражениями (1) и (2).

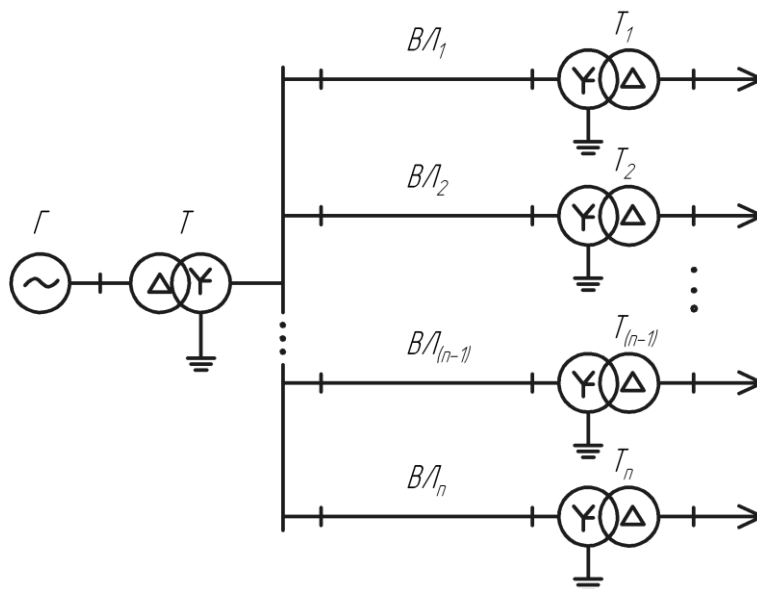


Рис. 1. Расчетная схема радиальной сети

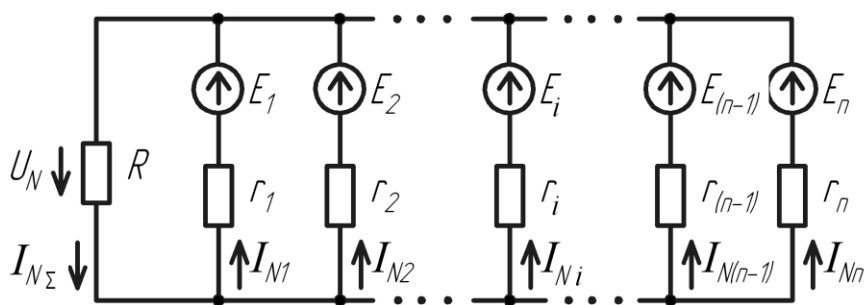


Рис. 2. Упрощенная схема замещения для расчета ГИТ в нейтралях силовых трансформаторов радиальной электрической сети

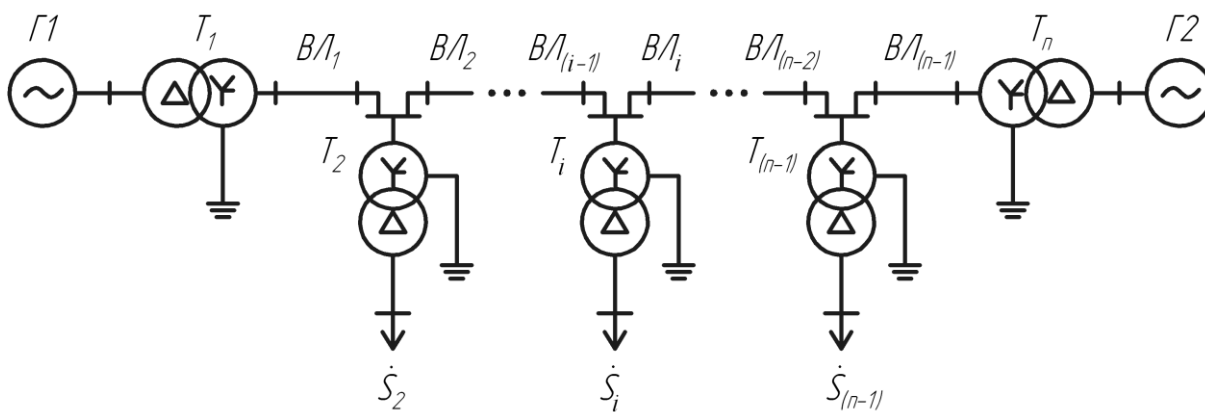


Рис. 3. Расчетная схема магистральной электрической сети с двухсторонним питанием

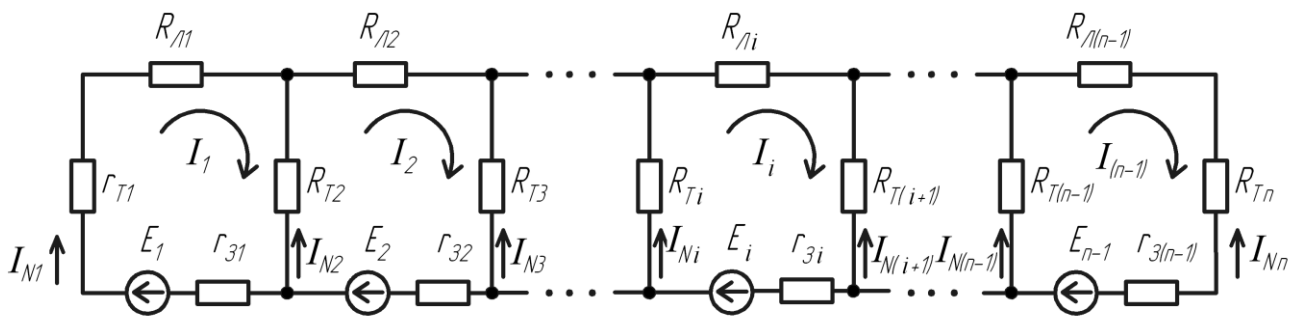


Рис. 4. Упрощенная схема замещения для расчета ГИТ в обмотках ВН и заземленных нейтралей силовых трансформаторов

Величина ГИТ в глухозаземленных нейтралях силовых трансформаторов при магистральной конфигурации электрической сети определяется соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} I_{N1} &= I_1, \\ I_{N2} &= I_2 - I_1, \\ &\dots\dots\dots \\ I_{Ni} &= I_i - I_{(i-1)}, \\ &\dots\dots\dots \\ I_{N(n-1)} &= I_{(n-1)} - I_{(n-2)}, \\ I_{Nn} &= -I_{(n-1)}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где $I_1, \dots, I_i, \dots, I_{(n-1)}$ – контурные токи, протекающие в замкнутых контурах, образованных глухозаземленными нейтралями и обмотками ВН силовых трансформаторов, фазными проводами ВЛ.

Система уравнений для контурных токов имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} R_{Л1} \cdot I_1 + R_{Л2} \cdot I_2 + \dots + R_{Лi} \cdot I_i + \dots \\ \dots + R_{Л(n-2)} \cdot I_{(n-2)} + R_{Л(n-1)} \cdot I_{(n-1)} &= E_1, \\ &\dots\dots\dots \\ R_{Л1} \cdot I_1 + R_{Л2} \cdot I_2 + \dots + R_{Лi} \cdot I_i + \dots \\ \dots + R_{Л(n-2)} \cdot I_{(n-2)} + R_{Л(n-1)} \cdot I_{(n-1)} &= E_i, \\ &\dots\dots\dots \\ R_{(n-1)1} \cdot I_1 + R_{(n-1)2} \cdot I_2 + \dots + R_{(n-1)i} \cdot I_i + \dots \\ \dots + R_{(n-1)(n-2)} \cdot I_{(n-2)} + R_{(n-1)(n-1)} \cdot I_{(n-1)} &= E_{n-1}, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где R_{ii} – собственное сопротивление контура i ; R_{ij} – общее сопротивление контуров i и j .

Собственное сопротивление контура i определяется выражением:

$$R_{ii} = R_{Ti} + R_{Ли} + R_{T(i+1)} + r_{3i}, \quad (10)$$

а общее сопротивление контуров i и j выражением:

$$R_{ij} = R_{ji} = -R_{Tj}. \quad (11)$$

Необходимо отметить, что все общие сопротивления $R_{ij} = R_{ji} = 0$ при $|i - j| \geq 2$.

Анализ выражений (8) – (11) позволяет установить, что наибольшие по величине геоиндуцированные токи будут протекать в нейтралях магистральных силовых трансформаторов T_1 и T_n , через которые осуществляется питание магистральной электрической сети.

Таким образом, в системах электроснабжения радиальной конфигурации наиболее «сильному» воздействию ГИТ подвергается центральный силовой трансформатор, который в первую очередь нуждается в защите от воздействия геоиндуцированных токов. При произвольном количестве трансформаторов в системах электроснабжения магистральной конфигурации наиболее «сильным» воздействиям ГИТ будут подвергаться магистральные трансформаторы T_1 и T_n , более «слабым» воздействиям трансформаторы T_2 и T_{n-1} , а «внутренние» трансформаторы T_3, \dots, T_{n-2} воздействию ГИТ не подвергаются. Поэтому в защите от воздействия ГИТ в магистральных электрических сетях в первую очередь нуждаются магистральные силовые трансформаторы.

Следует отметить, оптимальная длина воздушных линий электропередач напряжением 110 – 220 кВ, при которой воздействие ГИТ на силовые трансформаторы будет минимальным, определяется выражением:

$$L_{\text{опт}} \leq 5 \cdot \frac{Z_{\text{Эн}}}{\sqrt{x_{0Л}^2 + r_{0Л}^2}}, \quad (12)$$

где $Z_{\text{Эн}}$ – эквивалентное сопротивление нагрузки ЛЭП; $x_{0Л}, r_{0Л}$ – индуктивное и активное погонные сопротивления воздушной ЛЭП 110 – 220 кВ.

Для электрических сетей 110 – 220 кВ с преобладающей двигательной нагрузкой $L_{\text{опт}} \leq 20,3$ км. При большей длине воздушных ЛЭП рекомендуется включение кабельных вставок, которые служат естественной защитой – фильтром от высших гармоник тока намагничивания.

ОГРАНИЧЕНИЕ НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ СЭС ПРИ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЯХ

При протекании геоиндуцированных токов по заземленным обмоткам силовых трансформаторов из-за дополнительного нагрева металлических и токоведущих частей температура их наиболее нагретой точки (ННТ) может превысить предельно допустимую при номинальной, кратковременных и продолжительных аварийных нагрузках СТ, установленную ГОСТ [10 – 12], что может вызвать интенсивное газообразование и привести к срабатыванию газовой защиты на отключение силового трансформатора и нарушению электроснабжения потребителей. Поэтому величина ГИТ может наложить ограничения на нагрузочную способность силовых трансформаторов при геомагнитных бурях. Ограничение нагрузочной способности особенно необходимо учитывать для силовых трансформаторов, подвергающихся наиболее «сильному» воздействию ГИТ.

Дополнительные тепловые потери, возникающие при протекании ГИТ по заземленным обмоткам силового трансформатора и, как следствие, увеличении тока намагничивания, можно сопоставить с эквивалентным эффектом от увеличения рабочих токов при изменении нагрузки СТ. Суммарные потери в обмотках силовых трансформаторов при воздействии ГИТ при геомагнитных бурях определяются по выражениям:

для обмотки высокого напряжения (ВН)

$$P_{\text{обл}\Sigma}^B = P_{\text{осн}}^B + \tilde{P}_{\text{осн}}^B + P_{\text{вих}}^B + \tilde{P}_{\text{вих}}^B, \quad (13)$$

для обмотки низкого напряжения (НН)

$$P_{\text{обл}\Sigma}^H = P_{\text{осн}}^H + \tilde{P}_{\text{осн}}^H + P_{\text{вих}}^H + \tilde{P}_{\text{вих}}^H, \quad (14)$$

суммарные потери для обмоток ВН и НН

$$P_{\text{обл}\Sigma} = P_{\text{обл}\Sigma}^B + P_{\text{обл}\Sigma}^H = P_{\text{осн}\Sigma} + \tilde{P}_{\text{осн}\Sigma} + P_{\text{вих}\Sigma} + \tilde{P}_{\text{вих}\Sigma}, \quad (15)$$

где $P_{\text{осн}\Sigma} = P_{\text{осн}}^B + P_{\text{осн}}^H$ – суммарные основные потери в обмотках силового трансформатора при отсутствии ГИТ; $\tilde{P}_{\text{осн}\Sigma} = \tilde{P}_{\text{осн}}^B + \tilde{P}_{\text{осн}}^H$ – суммарные дополнительные основные потери в обмотках силового трансформатора, вызванные протеканием ГИТ по заземленной обмотке ВН силового трансформатора; $P_{\text{вих}\Sigma} = P_{\text{вих}}^B + P_{\text{вих}}^H$ – суммарные добавочные потери в обмотках от вихревых токов при отсутствии ГИТ; $\tilde{P}_{\text{вих}\Sigma} = \tilde{P}_{\text{вих}}^B + \tilde{P}_{\text{вих}}^H$ – суммарные дополнительные добавочные потери в обмотках от вихревых токов, вызванные протеканием ГИТ по заземленной обмотке ВН силового трансформатора.

Методика расчета дополнительных основных и дополнительных добавочных потерь в обмотках силовых трансформаторов, вызванных протеканием ГИТ в заземленной обмотке ВН, приведена в [13].

Для определения допустимой нагрузочной способности силового трансформатора при воздействии ГИТ воспользуемся выражением для определения превышения температуры наиболее нагретой точки обмотки над температурой окружающей силовой трансформатор среды (воздуха):

$$\Delta\Theta_{\text{ННТ}} = \Delta\Theta_{\text{ММ,н}} \cdot \left(\frac{\alpha + k_3^2}{\alpha + 1} \right) + 1,1 \cdot \Delta\Theta_{\text{О-М,н}} \cdot k_{3,В}^{2m}, \quad (16)$$

где $\Delta\Theta_{\text{ММ,н}}$ – превышение наибольшей температуры масла в баке над температурой окружающей среды при номинальной нагрузке; $\Delta\Theta_{\text{О-М,н}}$ – превышение средней температуры обмотки над средней температурой масла в обмотке при номинальной нагрузке; α – отношение потерь холостого хода к потерям короткого замыкания ($\alpha = P_x / P_k$); k_3 – коэффициент загрузки силового трансформатора, $k_3^2 = \frac{P_{\text{обл}\Sigma}}{P_k}$; $k_{3,В}$ – коэффициент загрузки обмотки ВН силового трансформатора,

$$k_{3,B}^2 = \frac{P_{обм\Sigma}^B}{P_{\kappa}^B}; m' - \text{коэффициент, характеризующий систему охлаждения СТ.}$$

При номинальной нагрузке силового трансформатора $k_3 = k_{3,B} = 1$. Превышение температуры наиболее нагретой точки обмотки над температурой окружающей среды (воздуха) при номинальной нагрузке силового трансформатора:

$$\Delta\Theta_{ННТ,н} = \Delta\Theta_{ММ,н} + 1,1 \cdot \Delta\Theta_{О-М,н} \cdot (17)$$

С учетом выражения для предельного превышения температуры наиболее нагретой точки обмотки $\Theta_{npННТ}$ над температурой окружающего воздуха Θ_B :

$$\Delta\Theta_{npННТ} = \Theta_{npННТ} - \Theta_B \cdot (18)$$

определены ограничения $\Delta\Theta_{npННТ,1} = 100^{\circ}C$ при $\Theta_{B,1} = 40^{\circ}C$ и $\Delta\Theta_{npННТ,2} = 120^{\circ}C$ при $\Theta_{B,2} = 20^{\circ}C$.

Зависимости превышения температуры ННТ заземленной обмотки ВН над температурой окружающей среды от величины ГИТ при различной нагрузке для силового трансформатора

ТВДН-63000/115/6,3/6,3, построенные по выражению (16), приведены на рис. 5. Для силового трансформатора ТВДН-63000/115/6,3/6,3 с учетом его паспортных данных превышение температуры наиболее нагретой точки при номинальной нагрузке по формуле (17) $\Delta\Theta_{ННТ,н} = 77,4^{\circ}C$.

Зависимости $\Delta\Theta_{npННТ} = f(I_{ГИТ}, K_3)$ определены для силовых трансформаторов типа ТВДН и ТВДЦН напряжением 115/10,5/10,5 и 115/6,3/6,3 и мощностями 25...80 МВА, которые позволили с учетом ограничений $\Delta\Theta_{npННТ,1} = 100^{\circ}C$ и $\Delta\Theta_{npННТ,2} = 120^{\circ}C$ определить допустимые уровни геоиндуцированных токов в их заземленных обмотках при различной нагрузочной способности (рис. 6).

Получено, при геомагнитных бурях аварийная перегрузка силовых трансформаторов указанного типа допустима в пределах 18 – 32% при температуре окружающего воздуха $\Theta_{B,2} = 20^{\circ}C$. Нижнее значение соответствует мощности 25 МВА, верхнее – 80 МВА. При температуре окружающего воздуха $\Theta_{B,1} = 40^{\circ}C$ предельно допустимая нагрузка силовых трансформаторов снижается на 10 %.

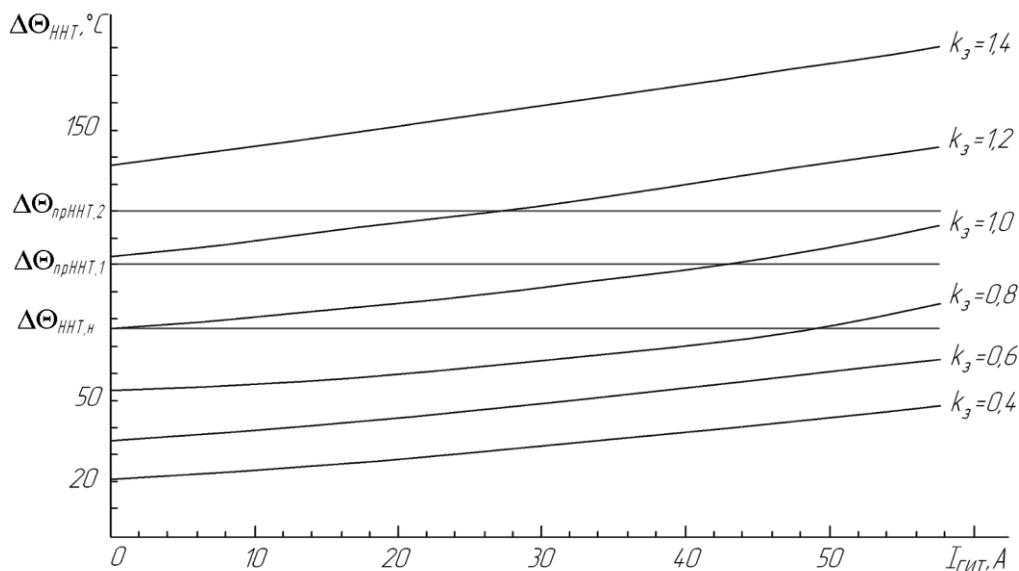


Рис. 5. Зависимости превышения температуры ННТ обмотки ВН над температурой окружающей среды от величины ГИТ при различной нагрузке силового трансформатора ТВДН-63000/115/6,3/6,3

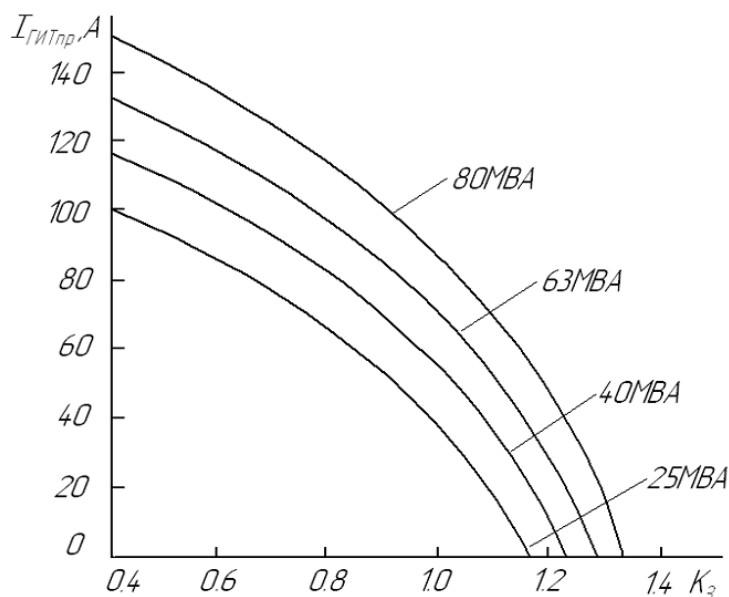


Рис. 6. Допустимые уровни геоиндуцированных токов в обмотке ВН от нагрузочной способности силовых трансформаторов типа ТРДН и ТРДЦН при температуре окружающего воздуха $\Theta_{B,2} = 20^0 C$

Таким образом, с уменьшением номинальной мощности силового трансформатора снижается предельно возможная перегрузка силового трансформатора при геомагнитных бурях. Увеличение нагрузочной способности силовых трансформаторов выше установленных значений при геомагнитных бурях может привести к перегреву обмоток силового трансформатора и срабатыванию газовой защиты силового трансформатора на отключение, что приведет к нарушению электроснабжения потребителей СЭС.

Разработанная методика определения допустимой нагрузочной способности силовых трансформаторов СЭС при геомагнитных бурях различной интенсивности позволит обеспечить безаварийное функционирование СТ, подверженных наиболее сильному воздействию геоиндуцированных токов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлено:

1. На величину геоиндуцированных токов в заземленных нейтралях силовых трансформаторов влияют интенсивность геоэлектрического поля, конфигурация и протяженность электрической сети напряжением 110 кВ и выше.
2. Геоиндуцированные токи, протекающие по заземленным нейтралям силовых трансформаторов, накладывают ограничения на их нагрузочную способность.
3. Риски развития аварий в системах электроснабжения возможно снизить за счет предварительного определения возможных значений геоиндуцированных токов в глухозаземленных нейтралях силовых трансформаторов и ограничения их нагрузочной способности в зависимости от интенсивности геомагнитных бурь.

REDUCING THE RISK OF ACCIDENTS IN ELECTRIC POWER SYSTEMS AT THE GEOMAGNETIC STORMS

Vakhnina V.V., Kuvshinov A.A., Kuznetsov V.A.

According to the analysis of the distribution of geinducted currents (GIC) depending of electric power system configuration were identified the power transformers which will be most exposed to the impact of GIC and this power transformers should be reserved first of all.

KEY WORDS: GEOMAGNETIC STORMS, GEOINDUCTED CURRENTS, ELECTRIC POWER SUPPLY SYSTEM, POWER TRANSFORMERS, ADDITIONAL HEAT LOSSES.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гершенгорн А.И. Воздействия геомагнитных токов на электрооборудование энергосистем // Электрические станции. 1993. № 6. С. 54 – 63.
2. Document C-15. Procedures for Solar Magnetic Disturbance Which Affect Electric Power Systems: Approved by the Task Force on Coordination of Operation on April 10, 1989. 27 p.
3. Скопинцев В.А., Маркитанов Д.В. Влияние космических факторов на повреждаемость в электрических сетях // Энергетик. 2012. № 10. С. 8 – 11.
4. РД 153-34.0-20.801-2000. Инструкция по расследованию и учету технологических нарушений в работе энергосистем, электростанций, котельных, электрических и тепловых сетей.
5. Правила расследования аварий в электроэнергетике. Постановление Правительства Российской Федерации от 28.10.2009 № 846.
6. Prijola, R. Effect of interactions between stations on the calculation of geomagnetically induced currents in an electric power transmission systems// Earth Planet Space. № 60. 2008. P. 743 – 751.
7. Петрукович А. У природы есть и космическая погода // Наука и жизнь. 2001. №10. С. 57 – 62.
8. Мозгалева К.В., Неклепаев Б.Н., Шунтов А.В. Об эффективности заземления нейтралей авто- трансформаторов через реактор или резистор // Электричество. 2004. №1. С. 32 – 39.
9. Вахнина В.В., Кретов Д.А., Кузнецов В.А. Расчет геоиндуцированных токов в высоковольтных линиях электропередач систем электроснабжения при геомагнитных бурях // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. т. 14. № 6. С. 244 – 246.
10. ГОСТ 11677 – 85. Трансформаторы (и автотрансформаторы) силовые. Общие технические требования. – Введ. 1986-01-07. – М.: ИПК изд-во стандартов, 2002. 39 с.
11. ГОСТ 14209 – 97. Руководство по нагрузке силовых трансформаторов. Межгосударственный стандарт. – Введ. 2002-01-01. – Минск: Изд-во стандартов, 2001. 76 с.
12. МЭК 354 – 91. Loading guide for oil – immersed power transformers. Межгосударственный стандарт. – Введ. 2002-01-01. – Минск: Изд-во стандартов, 2001. 76 с.
13. Вахнина В.В. Моделирование режимов работы силовых трансформаторов систем электроснабжения при геомагнитных бурях. Монография. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2012. 104 с.