

ВЛИЯНИЕ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ПРИПОЛЯРНЫХ РАЙОНАХ НА РЕЖИМ ПЕРЕДАЧИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПО ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ

А.А. Кувшинов¹, В.В. Вахнина¹, А.Ю. Хренников², А.Н. Черненко¹

¹ ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», Тольятти, Россия

² АО «Научно-технический Центр Федеральной сетевой компании ЕЭС»

✉ Ak2390@inbox.ru, AlekseiKuvshinov@yandex.ru, vvahnina@yandex.ru

Получены аналитические выражения для определения реактивной мощности в начале и в конце межсистемной воздушной линии с учетом параметров ветвей намагничивания силовых трансформаторов, позволяющие учитывать интенсивность воздействия геомагнитных возмущений на режимы электропередачи. Показано, что увеличение интенсивности геоиндуцированных токов способно полностью нарушить транзит реактивной мощности из-за многократного увеличения мощности намагничивания силовых трансформаторов в результате одностороннего насыщения магнитных систем. Приведен численный пример, иллюстрирующий возможность прекращения транзита реактивной мощности при достаточно интенсивных геомагнитных возмущениях.

Ключевые слова: воздушная линия, силовой трансформатор, геоиндуцированные токи, реактивная мощность.

INFLUENCE OF GEOMAGNETIC DISTURBANCES IN THE POLAR REGIONS ON THE REACTIVE POWER TRANSMISSION MODE ON THE AIRLINE

Aleksey A. KUVSHINOV¹, Vera V. VAKHNINA¹, Alexander Yu. KHRENNIKOV², Aleksey N. CHERNENKO¹

¹ Togliatti State University, Togliatti, Russia

² Research and Development Center at Federal Grid Company of United Energy System, Moscow, Russia

Analytical expressions are obtained for determining reactive power at the beginning and at the end of an intersystem overhead line, taking into account the parameters of the magnetization branches of power transformers, which allow one to take into account the intensity of the influence of geomagnetic disturbances on power transmission modes. It is shown that an increase in the intensity of geo-induced currents can completely disrupt the transit of reactive power due to the multiple increase in the magnetization power of power transformers as a result of one-sided saturation of magnetic systems. A numerical example is given illustrating the possibility of terminating the transit of reactive power with sufficiently intense geomagnetic disturbances.

Keywords: overhead line, power transformer, geo-induced currents, reactive power.

Статья получена: 11.11.2019

Принята к публикации: 04.12.2019

Опубликована онлайн: 26.03.2020

Введение. Многолетние наблюдения отмечают около 2500 геомагнитных возмущений, идентифицируемых как «магнитная буря» и «сильная магнитная буря» в течение 11-летнего цикла солнечной активности [1-4]. Геомагнитные возмущения вызывают протекание геоиндуцированных токов (ГИТ) в заземленных обмотках высокого напряжения (ВН) силовых трансформаторов электрических сетей с номинальным напряжением 110 кВ и выше. Под воздействием ГИТ режим перемагничивания электротехнической стали силовых трансформаторов с бронестержневой и бронеовой конструкцией магнитной системы смещается в область технического насыщения [5,6]. Возникает одностороннее насыщение магнитной системы силового трансформатора. В результате ток намагничивания приобретает практически однополярную форму и многократно превышает номинальный ток холостого хода [7]. Мощность намагничивания силового трансформатора также многократно возрастает, оказывая существенное влияние на баланс реактивных мощностей в воздушных линиях электропередачи [8,9]. В частности, ГИТ, вызванные в электроэнергетической системе Hydro-Quebec

Канады геомагнитной бурей 22 октября 1999 г., послужили причиной увеличения потерь реактивной мощности с последующим развитием лавины напряжений [10,11].

Таким образом, задача исследования механизмов влияния ГИТ, вызванных геомагнитными возмущениями, на режимы передачи реактивной мощности по воздушной линии является актуальной, причем особую актуальность данная задача приобретает для высокоширотных линий электропередачи.

Расчетная схема межсистемной электропередачи. Расчетная схема (а) и схема замещения (б) межсистемной воздушной линии (ВЛ), связывающей две электроэнергетические системы ЭЭС₁ и ЭЭС₂, показаны на рис.1. Нейтрали обмоток высокого напряжения (ВН) силовых трансформаторов T_1 и T_2 заземлены. Геомагнитные возмущения инициируют возникновение на поверхности земли квазипостоянного геоэлектрического поля и соответственно разности потенциалов между заземляющими устройствами нейтралей обмоток ВН силовых трансформаторов T_1 и T_2 , которая учитывается в расчетной схеме источником квазипостоянной ЭДС ($e_{ГИТ}$ на рис.1,а).

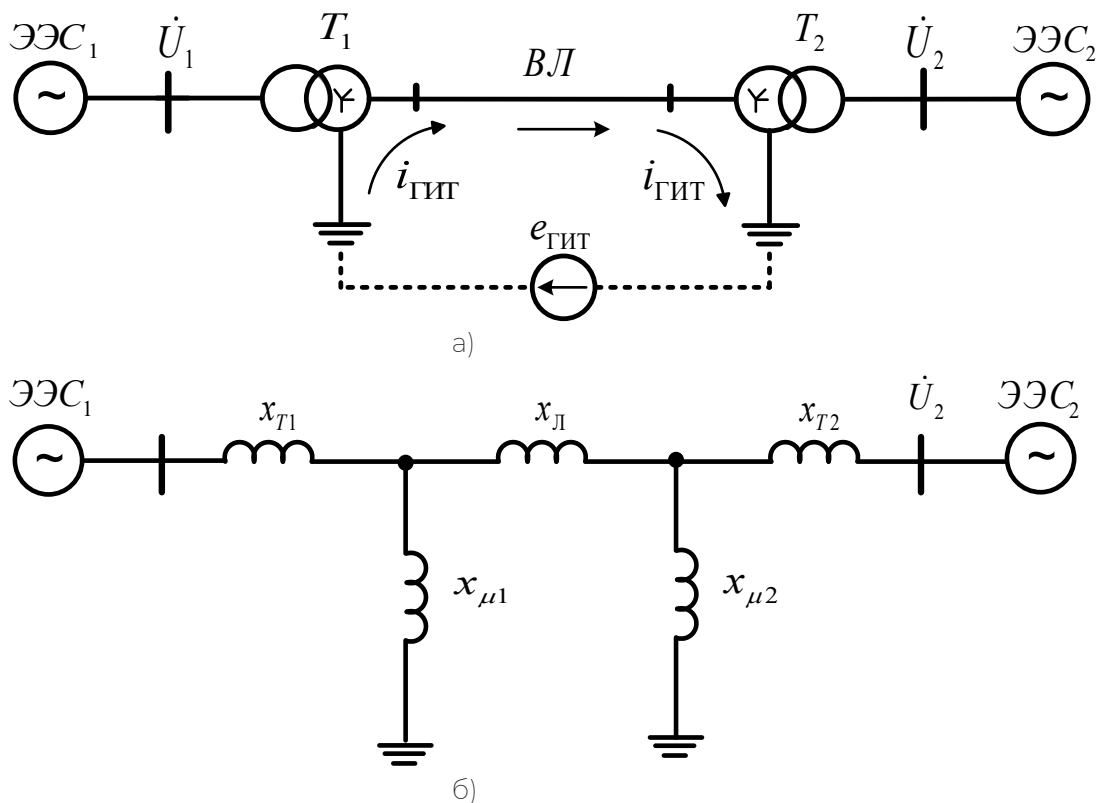


Рисунок 1 – Расчетная схема (а) и схема замещения (б) межсистемной ВЛ.

Под воздействием квазипостоянной ЭДС по обмоткам ВН силовых трансформаторов T_1 и T_2 и фазным проводам ВЛ протекают ГИТ по контуру, показанному на рис.1,а.

На рис. 1,б представлена схема замещения, в которой силовые трансформаторы T_1, T_2 представлены упрощенной Г-образной схемой замещения, для количественных оценок вариаций режима передачи реактивной мощности под воздействием ГИТ. На схеме замещения использованы следующие обозначения:

$x_{л1}$ - индуктивное сопротивление фазных проводов ВЛ;

$x_{т1}, x_{т2}$ - индуктивная составляющая сопротивления короткого замыкания силовых трансформаторов T_1, T_2 соответственно;

$x_{\mu 1}, x_{\mu 2}$ - индуктивное сопротивление намагничивания силовых трансформаторов T_1, T_2 соответственно;

\dot{U}_1, \dot{U}_2 - напряжения на шинах ЭЭС₁ и ЭЭС₂ соответственно.

Потери активной мощности в фазных проводах ВЛ и силовых трансформаторах T_1, T_2 не учитываются. ГИТ, протекая по заземленным обмоткам ВН, вызывают одностороннее насыщение магнитных систем силовых трансформаторов T_1 и T_2 . Данное обстоятельство обуславливает уязвимость рассматриваемой ВЛ к воздействию ГИТ, результатом которого является многократное уменьшение индуктивных сопротивлений $x_{\mu 1}, x_{\mu 2}$ ветвей намагничивания силовых трансформаторов T_1 и T_2 из-за существенной нелинейности основной кривой намагничивания электротехнической стали магнитной си-

стемы [12]. Именно изменение индуктивных сопротивлений ветвей намагничивания силовых трансформаторов T_1 и T_2 является фактором, определяющим существенное влияние ГИТ на режимные параметры электропередачи.

Потоки реактивной мощности по межсистемной воздушной линии.

Комплексы токов электрических сетей ЭЭС₁ (\dot{I}_1) ЭЭС₂ (\dot{I}_2) определяются системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{U}_1 \cdot \dot{Y}_{11} - \dot{U}_2 \cdot \dot{Y}_{12} \\ \dot{I}_2 &= \dot{U}_1 \cdot \dot{Y}_{21} - \dot{U}_2 \cdot \dot{Y}_{22} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где \dot{Y}_{11} – комплекс собственной проводимости ветви ЭЭС₁ при отсутствии источника напряжения;

$\dot{U}_2; \dot{Y}_{22}$ – комплекс собственной проводимости ветви ЭЭС₂ при отсутствии источника напряжения;

$\dot{U}_1; \dot{Y}_{12}$ – комплекс взаимной проводимости ветвей ЭЭС₁ и ЭЭС₂.

Комплексы собственных и взаимной проводимостей будут определяться выражениями

$$\dot{Y}_{11} = y_{11} \cdot e^{-j90},$$

$$\dot{Y}_{22} = y_{22} \cdot e^{-j90},$$

$$\dot{Y}_{12} = y_{12} \cdot e^{-j90},$$

а модули собственных и взаимной проводимостей – выражениями

$$\begin{aligned} y_{11} &= \frac{(x_2 + x_{\mu(\text{ЭЭС})})}{(x_1 + x_2 + x_1 \cdot x_{\mu(\text{ЭЭС})} + x_2 \cdot x_{\mu(\text{ЭЭС})}), \\ y_{22} &= \frac{(x_1 + x_{\mu(\text{ЭЭС})})}{(x_1 + x_2 + x_1 \cdot x_{\mu(\text{ЭЭС})} + x_2 \cdot x_{\mu(\text{ЭЭС})}), \\ y_{12} = y_{21} &= \frac{x_{\mu(\text{ЭЭС})}}{(x_1 + x_2 + x_1 \cdot x_{\mu(\text{ЭЭС})} + x_2 \cdot x_{\mu(\text{ЭЭС})}), \end{aligned} \quad (2)$$

где
$$x_1 = \frac{x_L \cdot x_{\mu 1}}{x_{\mu 1} + x_L + x_{\mu 2}},$$

$$x_2 = \frac{x_L \cdot x_{\mu 2}}{x_{\mu 1} + x_L + x_{\mu 2}},$$

$$x_{\mu(\text{ЭКВ})} = \frac{x_{\mu 1} \cdot x_{\mu 2}}{x_{\mu 1} + x_L + x_{\mu 2}}.$$

Анализ выражений (2) позволяет заключить, что собственные y_{11} , y_{22} и взаимная y_{12} , проводимости межсистемной электропередачи также зависят от величины ГИТ. Поэтому в условиях геомагнитных возмущений поддержания неизменными напряжений $U_1 = \text{const}$, $U_2 = \text{const}$ на шинах ЭЭС₁, ЭЭС₂ недостаточно, как показывает выражение (1), для сохранения неизменными комплексов токов \dot{I}_1 , \dot{I}_2 и следовательно режима передачи активной и реактивной мощности по межсистемной электропередаче. На рис.2 представлены кривые, показывающие характер изменения эквивалентного индуктивного сопротивления ветвей

намагничивания силовых трансформаторов T_1 и T_2 в зависимости от глубины насыщения магнитных систем под воздействием ГИТ, которая определяется величиной фазового угла насыщения.

В качестве количественного критерия глубины насыщения магнитной системы силового трансформатора использована величина фазового угла насыщения (φ), определяющего продолжительность однополярных бросков тока намагничивания на периоде напряжения при воздействии ГИТ [8]. С помощью выражений (1) можно определить величину реактивной мощности, выдаваемой ЭЭС₁

$$Q_1 = U_1^2 \cdot y_{11} - U_1 \cdot U_2 \cdot y_{12} \cdot \cos \delta \quad (3)$$

и величину реактивной мощности, поступающую в ЭЭС₂

$$Q_2 = U_1 \cdot U_2 \cdot y_{12} \cdot \cos \delta - U_2^2 \cdot y_{22}, \quad (4)$$

где δ - угол между векторами напряжений ЭЭС₁ и ЭЭС₂.

Сравнивая (3) и (4), видно, что ЭЭС₁ выдает, а ЭЭС₂ потребляет реактивную мощность, т.е. знаки Q_1 и Q_2 противоположны.

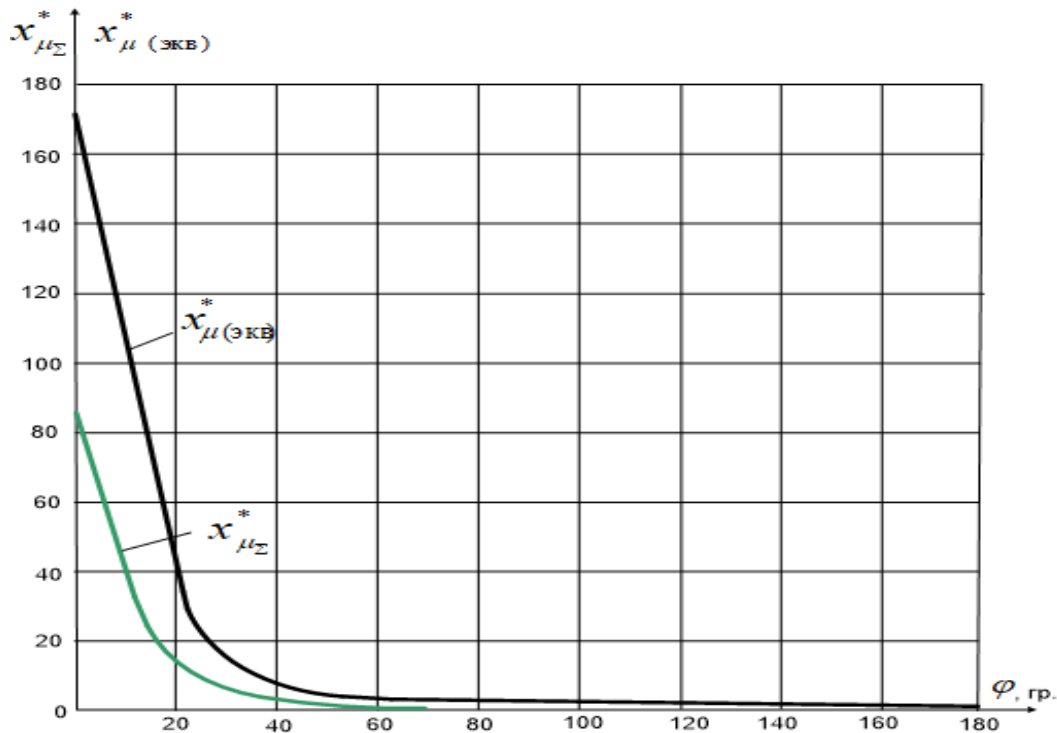


Рисунок 2 – Зависимость эквивалентного индуктивного сопротивления ($x_{\mu(ЭКВ)}^*$) ветви намагничивания одного силового трансформатора и двух однотипных силовых трансформаторов ($x_{\mu\Sigma}^*$) от фазового угла насыщения магнитной системы.

Тогда потери реактивной мощности в индуктивных сопротивлениях электропередачи будут определяться алгебраической суммой

$$\Delta Q = Q_1 + Q_2 = U_1^2 \cdot y_{11} - U_2^2 \cdot y_{22}, \quad (5)$$

т.е. при $U_1^2 \cdot y_{11} > U_2^2 \cdot y_{22}$ потери покрываются за счет реактивной мощности ЭЭС₁, а при $U_1^2 \cdot y_{11} < U_2^2 \cdot y_{22}$ потери покрываются за счет потребления реактивной мощности из ЭЭС₂.

Анализ полученных выражений позволяет отметить, что неизменные значения режимных параметров ($U_1 = const, U_2 = const, \delta = const$) не обеспечат в условиях геомагнитных возмущений сохранение режима передачи реактивной мощности.

На рис. 3 представлены энергетические диаграммы баланса реактивных мощностей электропередачи при отсутствии и при различных уровнях геомагнитных возмущений и соответственно ГИТ. Энер-

гетические диаграммы построены для случая работы ВЛ в натуральном режиме, когда мощность магнитного поля линии равна мощности электрического поля ($Q_M = Q_{ЭЛ}$), т.е. линия не потребляет и не генерирует реактивную мощность. При отсутствии геомагнитных возмущений $i_{ГИТ} = 0$, реактивной мощности Q_1 ЭЭС₁, определяемой выражением (3), достаточно для создания мощности намагничивания силовых трансформаторов $T_1, T_2, Q_{\mu 1}(i_{ГИТ}), Q_{\mu 2}(i_{ГИТ})$ соответственно и выдачи реактивной мощности Q_2 в приемную ЭЭС₂.

По мере увеличения ГИТ возрастает мощность намагничивания силовых трансформаторов T_1, T_2 настолько, что наступает равенство

$$Q_1 = Q_{\mu 1}(i_{ГИТ}) + Q_{\mu 2}(i_{ГИТ}),$$

т.е. вся реактивная мощность ЭЭС₁ расходуется только на покрытие мощности намагничивания. В приемную ЭЭС₂ реактивная мощность не отдается, т.е. $Q_2 = 0$ (рис.3,б).

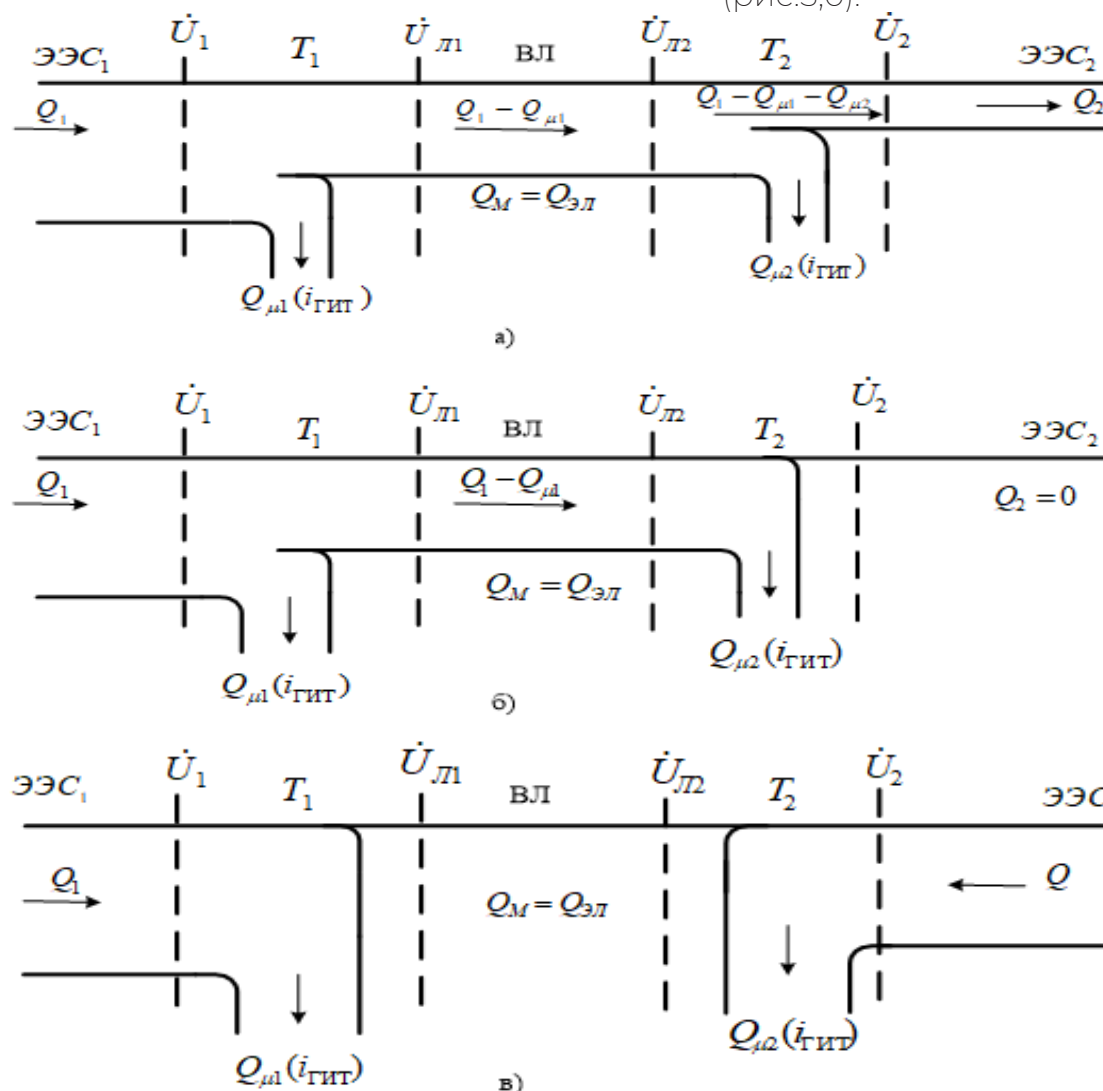


Рисунок 3 – Энергетические диаграммы потоков реактивной мощности в электропередаче при:
 а) $i_{ГИТ} = 0$;
 б) $i_{ГИТ} = I_{ГИТ}$;
 в) $i_{ГИТ} = I_{ГИТ2} > I_{ГИТ}$

При дальнейшем увеличении ГИТ возможно увеличение мощности намагничивания силового трансформатора T_1 до уровня (рис.3,в)

$$Q_{\mu 1}(i_{ГИТ}) = Q_1.$$

В этом случае для поддержания уровня напряжения U_2 в конце линии мощность намагничивания силового трансформатора T_2 должна покрываться потреблением реактивной мощности из приемной ЭЭС, т.е.

$$Q_{\mu 2}(i_{ГИТ}) = Q_2,$$

которая должна обладать соответствующим резервом реактивной мощности.

На рис.4 представлены графики изменения суммарной мощности намагничивания силовых трансформаторов T_1, T_2 (кривая 1), реактивной мощности, выдаваемой ЭЭС₁ (кривая 2) и потребляемой, а затем и выдаваемой ЭЭС₂ (кривая 3) в зависимости от интенсивности геомагнитных возмущений, возрастание которой вызывает увеличение фазового угла насыщения (φ) магнитных систем силовых трансформаторов T_1, T_2 . Зависимости построены с помощью выражений (3), (4) и (5) для слабо загруженной ($P_2^* = 0,1347$) и сравнительно «короткой» линии электропередачи, которая имеет следующие параметры

$$x_{T1}^* = x_{T2}^* = 0,08; x_{\mu 1}^* = x_{\mu 2}^* = 174,64; x_{Л}^* = 0,0506 (50км).$$

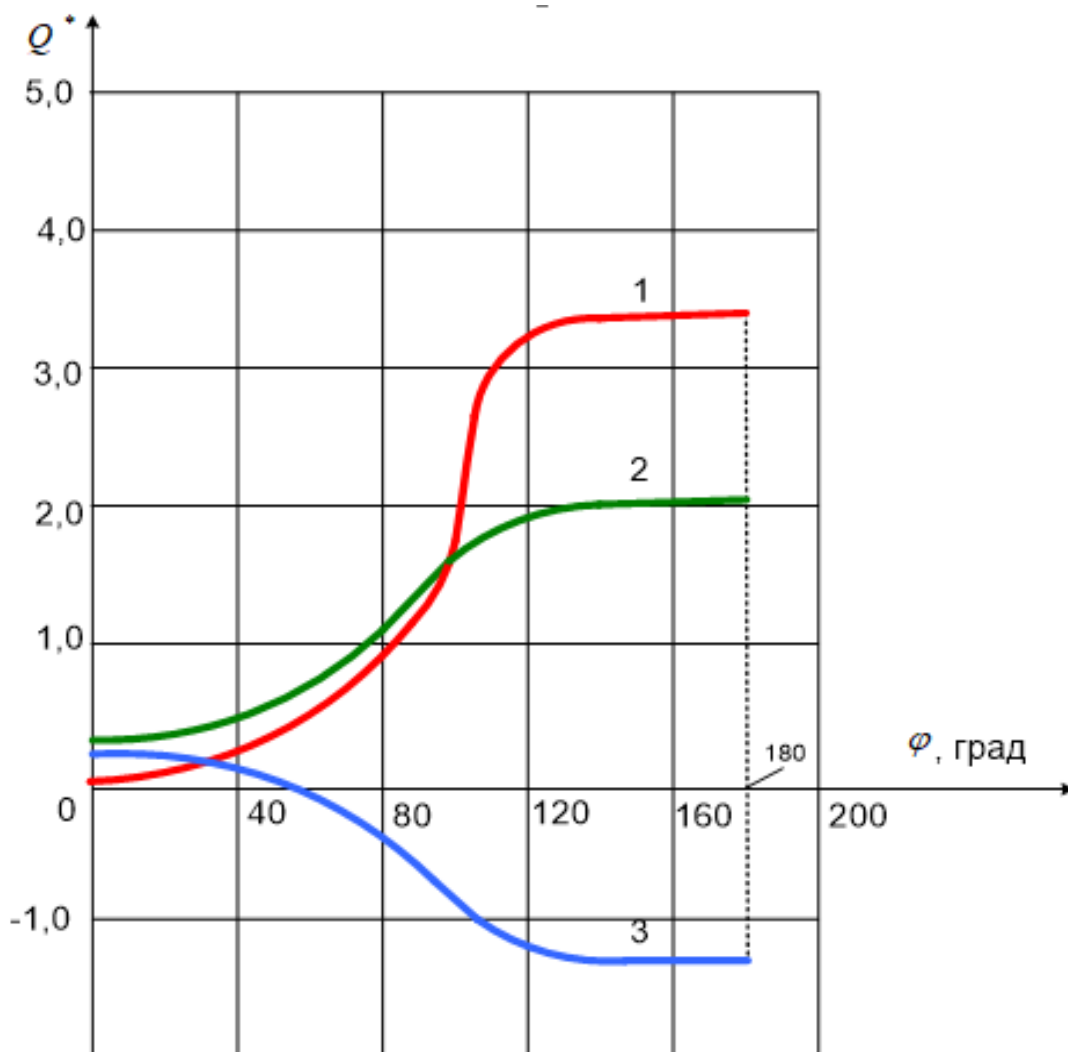


Рисунок 4 – Энергетические характеристики электропередачи при воздействии ГИТ (1 – суммарная мощность намагничивания силовых трансформаторов; 2 – реактивная мощность, выдаваемая ЭЭС₁; 3 – реактивная мощность, выдаваемая (потребляемая из) ЭЭС₂).

Представленные численные значения приведены к номинальным параметрам силовых трансформаторов. Индуктивные сопротивления ветвей намагничивания $X_{\mu 1}, X_{\mu 2}$, силовых трансформаторов T_1, T_2 указаны для режима нормального перемещения магнитных систем при отсутствии геомагнитных возмущений ($i_{\text{ГИТ}} = 0$). Как видно, по мере увеличения ГИТ и соответственно фазового угла насыщения магнитной системы силовых трансформаторов T_1, T_2 многократно возрастает суммарная мощность намагничивания силовых трансформаторов T_1, T_2 (кривая 1) от значения $Q_{\mu\Sigma}^* \cong 0,008$ при $\varphi = 0\text{гр.}$ до значения $Q_{\mu\Sigma}^* \cong 1,0$ при $\varphi \cong 84\text{гр.}$ т.е. фактически до значения номинальной мощности силового трансформатора [13, 14].

Дальнейшее увеличение интенсивности ГИТ и фазового угла насыщения от значения $\varphi \cong 84\text{гр.}$ до значения $\varphi \cong 120\text{гр.}$ сопровождается еще более резким увеличением суммарной мощности намагничивания, вплоть до значения $Q_{\mu\Sigma}^* \cong 3,2$, т.е. почти трехкратного значения номинальной мощности силового трансформатора. При $\varphi \geq 120\text{гр.}$ суммарная мощность намагничивания силовых трансформаторов возрастает только на 6%.

Увеличение суммарной мощности намагничивания силовых трансформаторов T_1, T_2 при возрастании интенсивности геомагнитных возмущений вызывает увеличение потребляемой из ЭЭС₁ реактивной мощности (кривая 2) и уменьшение реактивной мощности, поступающей в ЭЭС₂ (кривая 3). Наконец, при $\varphi \cong 50\text{гр.}$ выдача реактивной мощности в ЭЭС₂ прекращается и практически вся реактивная мощность, выдаваемая ЭЭС₁, расходуется на покрытие мощности намагничивания силовых трансформаторов T_1, T_2 и только $\approx 19\%$ на покрытие потерь реактивной мощности в продольных индуктивных сопротивлениях межсистемной электропередачи. Данная ситуация соответствует энергетической диаграмме, изображенной на рис.3,б. При $\varphi \cong 50\text{гр.}$ реактивная мощность начинает потребляться и из ЭЭС₂. С этого

момента возрастающая мощность намагничивания силовых трансформаторов T_1, T_2 , а также и потери реактивной мощности в продольных индуктивных сопротивлениях электропередачи начинают покрываться за счет потребления реактивной мощности как из ЭЭС₁, так и из ЭЭС₂ (см. также энергетическую диаграмму на рис.3,в). В частности, при $\varphi = 180\text{гр.}$ суммарная мощность намагничивания силовых трансформаторов T_1, T_2 на $\approx 60\%$ покрывается потреблением реактивной мощности из ЭЭС₁ и на $\approx 40\%$ потреблением реактивной мощности из ЭЭС₂. Однако это возможно только при наличии соответствующих резервов реактивной мощности. В противном случае геомагнитные возмущения при достаточной интенсивности способны инициировать развитие аварийной ситуации типа «лавина напряжения».

Заключение. В неразветвленной схеме передачи электроэнергии поток реактивной мощности в приемную систему существенно зависит от интенсивности геомагнитных возмущений, поскольку увеличение ГИТ способно вызвать многократное увеличение мощности намагничивания силовых трансформаторов повышающей и понижающей подстанций до значений достигающих и даже превышающих собственную номинальную мощность. По мере увеличения ГИТ уменьшается пропускная способность воздушной линии, а поток реактивной мощности в приемную систему уменьшается вплоть до полного прекращения и последующей инверсии направления передачи.

Список литературы:

1. Заболотная Н.А. Индексы геомагнитной активности. – Справочное пособие. Изд. 2-е, перераб., М.: Издательство ЛКИ, 2007, 88с.
2. Тертышников А.В. Возможные коррективы опасных гелиогеофизических явлений. – Гелиогеофизические исследования, выпуск 5, 2013, с.34-42.
3. Messerotti M. The NOAA Space Weather Scale tables. –COST Action 724, Athens, 11 October, 2005, p.1-4.
4. NOAA Space Weather Scales [Электронный ресурс]. URL: <http://www.swpc.noaa.gov/sites/default/files/images/NOAAscales.pdf> (дата обращения: 21.11.2016).
5. Coles R.L., Thompson K., Jansen van Beek G. A Comparison between the Rate of Change in the Geomagnetic Field and the Geomagnetically Induced Currents in a Power Transmission System. – Proceedings: Geomagnetically Induced Currents Conference, TR-100450, Electric Power Research Institute. Palo Alto. California, 1992.
6. Kappenman J.C., Albertson V.D. Bracing for the Geomagnetic Storm. – IEEE Spectrum, 1990, 28, №3.
7. Takasu N., Oshi T., Miyawaki F., Saito S., Fujiwara Y. An Experimental Analysis of Excitation of Transformers by Geomagnetically Induced Currents. – IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, Vol. 9, №2.
8. Вахнина В.В., Кувшинов А.А., Черненко А.Н. Влияние геомагнитной активности на мощность намагничивания силовых трансформаторов электрических сетей. – Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность, 2016, №2.
9. Вахнина В.В. Компенсация реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий : учебное пособие. – Тольятти, Изд-во ТГУ, 2011.
10. Kappenman J.C. Advanced Geomagnetic Storm Forecasting: A Risk Management Tool for Electric Power Operations. – IEEE Transactions on Plasma Science, Special Issue on Space Plasmas, 2000, Vol. 28, №6.
11. Boteller D.H. Effects of geomagnetically induced current in B. C. Hydro 500 kV – System. – IEEE Trans. On Power Delivery, 1989, 4, №1, p. 818-823.
12. Кувшинов А.А., Вахнина В.В., Селемир В.Д., Карелин В.И. Пропускная способность межсистемных электропередач в условиях геомагнитной активности. – Электричество, 2016, №9.
13. Хренников А.Ю. Высоковольтное электротехническое оборудование в электроэнергетических системах: диагностика, дефекты, повреждаемость, мониторинг. Учебное пособие, Магистратура — М.: ИНФРА-М, 2019- 186с., ил.
14. Khrennikov A.Yu., Kuvshinov A.A., Shkuropat I.A. Providing Reliable Operation of Electric Networks// Nova science publishers, New York, 2019, USA, p. 308, ISBN: 978-1-53615-422-1 <https://novapublishers.com/shop/providing-reliable-operation-of-electric-networks/>

References:

1. Zabolotnaya N.A. Indices of geomagnetic activity. - Reference manual. Ed. 2nd, revised., M.: Publishing house LKI, 2007, 88 pp.
2. Tertyshnikov A.V. Possible corrections of dangerous heliogeophysical phenomena. - Heliogeophysical research, issue 5, 2013, p. 34-42.
3. Messerotti M. The NOAA Space Weather Scale tables. –COST Action 724, Athens, October 11, 2005, p.1-4.
4. NOAA Space Weather Scales [Electronic resource]. URL: <http://www.swpc.noaa.gov/sites/default/files/images/NOAAscales.pdf> (accessed: 11.21.2016).
5. Coles R. L., Thompson K., Jansen van Beek G. A Comparison between the Rate of Change in the Geomagnetic Field and the Geomagnetically Induced Currents in a Power Transmission System. - Proceedings: Geomagnetically Induced Currents Conference, TR-100450, Electric Power Research Institute. Palo Alto. California, 1992.
6. Kappenman J.C., Albertson V.D. Bracing for the Geomagnetic Storm. - IEEE Spectrum, 1990, 28, No. 3.
7. Takasu N., Oshi T., Miyawaki F., Saito S., Fujiwara Y. An Experimental Analysis of Excitation of Transformers by Geomagnetically Induced Currents. - IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, Vol. 9, No. 2.
8. Vakhnina V.V., Kuvshinov A.A., Chernenko A.N. The effect of geomagnetic activity on the magnetization power of power transformers in electric networks. - Electro. Electrical Engineering, Electric Power Industry, Electrical Engineering Industry, 2016, No. 2.
9. Vakhnina V.V. Reactive Power Compensation in Power Supply Systems of Industrial Enterprises: A Training Manual. - Tolyatti, TSU Publishing House, 2011.
10. Kappenman J.C. Advanced Geomagnetic Storm Forecasting: A Risk Management Tool for Electric Power Operations. - IEEE Transactions on Plasma Science, Special Issue on Space Plasmas, 2000, Vol. 28, No. 6.
11. Boteller D.H. Effects of geomagnetically induced current in B. C. Hydro 500 kV - System. - IEEE Trans. On Power Delivery, 1989, 4, No. 1, p. 818-823.
12. Kuvshinov A.A., Vakhnina V.V., Selemir V.D., Karelin V.I. The capacity of intersystem power transmission in conditions of geomagnetic activity. - Electricity, 2016, No. 9.
13. Khrennikov A.Yu. High-voltage electrical equipment in electric power systems: diagnostics, defects, damage, monitoring. Textbook, Master's program - M.: INFRA-M, 2019 - 186p., ill.
14. Khrennikov A.Yu., Kuvshinov A.A., Shkuropat I.A. Providing Reliable Operation of Electric Networks // Nova science publishers, New York, 2019, USA, p. 308, ISBN: 978-1-53615-422-1 <https://novapublishers.com/shop/providing-reliable-operation-of-electric-networks/>