

Modified Two-core Phase-shifting Transformer Based on the Classical «Delta Connection» Scheme

Golub I.V., Zaitsev D.A., Zubareva I.G.

Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova
Chisinau, Republic of Moldova

Abstract. Nowadays, in joined power systems increases the role and significance of phase-shifting devices, which are used in the quality of FACTS-controllers (Flexible Alternative Current Transmission System), allowing solving various problems of modes management in a complex-closed inhomogeneous network. A modified version of the two-transformer circuit phase-adjusting device, built based on the classical single-transformer scheme «Delta Connection» has been studied in the paper. The proposed device's topology differs from the classical of single-transformer one so that the control coil is supplied by a lower voltage than phase level, which in turn makes it possible to use it in high rated voltage networks. A mathematical model of the device, which describes the change of parameters of operation mode of phase-shifting transformer under the adjusting of the phase-shifting angle, has been provided. The achieved results can be used for comparative analysis when determining the technical and economic efficiency in the deal of further development of phase rotating devices of transformer type.

Keywords: phase-shifting transformer, phase shift angle, a complex conversion factor, the calculated power of the device.

Instalatia modificată pentru reglare a decalajului de fază cu două transformatoare realizata in baza schemei clasice cu un singur transformator de tip «Delta Connection»

Golub I.V., Zaițev D.A., Zubareva I.G.

Institutul de Energetica al Academiei de Stiinte a Moldovei
Chisinau, Republica Moldova

Rezumat. În prezent, în sistemele energetice interconectate crește rolul și importanța instalațiilor de reglare a decalajului de fază, care sunt utilizate în calitate de FACTS-controlere (Flexible Alternative Current Transmission System), ce permit soluționarea diferitor sarcini de dirijare cu regimurile dintr-un sistem complex închis cu rețele neomogene. În lucrare se studiază o variantă perfecționată a schemei instalației de reglare a decalajului de fază cu două transformatoare, construit pe baza schemei clasice cu un singur transformator «Delta Connection». Schema propusă a instalației diferă de circuitul schemei clasice cu un transformator, astfel încât înfășurarea de dirijare este pusă la un nivel de tensiune mai mic decât nivelul tensiunii de fază, care, la rândul său, face posibilă utilizarea instalației în rețele de înaltă tensiune nominală. A fost construit un model matematic al instalației, care descrie schimbarea parametrilor regimului de funcționare a transformatorului de reglare a decalajului de fază la reglarea unghiului defazajului. Rezultatele obținute pot fi folosite la analiza comparativă pentru indentificarea eficienței tehnice și economice a instalațiilor de reglare a defazajului de tip transformator, elaborate în perspectivă.

Cuvinte-cheie: transformator de reglare a decalajului de fază, unghiul de defazaj, factorul complex de conversie, capacitatea estimată a instalației.

Модифицированное двухтрансформаторное фазорегулирующее устройство, выполненное на основе классической однострансформаторной схемы «Delta Connection»

Голуб И.В., Зайцев Д.А., Зубарева И.Г.

Институт энергетики Академии наук Молдовы
Кишинев, Республика Молдова

Аннотация. В настоящее время в объединенных энергосистемах возрастает роль и значение фазорегулирующих устройств, которые используются в качестве FACTS-контроллеров (Flexible Alternative Current Transmission System), позволяющих решать различные задачи управления режимами в сложно-замкнутой неоднородной сети. В работе исследуется модифицированный двухтрансформаторный схемный вариант фазорегулирующего устройства, построенный на основе классической однострансформаторной схемы «Delta Connection». Предлагаемая схема устройства отличается от классической однострансформаторной схемы тем, что обмотка управления вынесена на более низкий, чем фазное, уровень напряжения, что, в свою очередь, дает возможность использовать

предлагаемое устройство в сетях с высоким номинальным напряжением. Построена математическая модель данного устройства, описывающая изменение параметров режима работы фазорегулирующего трансформатора при регулировании угла фазового сдвига. Полученные результаты могут быть использованы для сравнительного анализа при определении технико-экономической эффективности разрабатываемых в перспективе фазоповоротных устройств трансформаторного типа.

Ключевые слова: фазорегулирующий трансформатор, угол фазового сдвига, комплексный коэффициент преобразования, расчетная мощность устройства.

Введение

В процессе разработки и внедрения концепции «интеллектуальной» или активно-адаптивной сети (SMART GRID), существенно возрастает роль устройств FACTS, позволяющих управлять параметрами режима энергосистемы в соответствии с выбранной стратегией [1]. Задачи обеспечения эффективного управления установившимися и переходными режимами электроэнергетических систем могут быть решены различными средствами, одним из которых является фазорегулирующий трансформатор (ФРТ). В настоящее время существует значительный мировой опыт применения ФРТ [2-5]. Также существенное внимание уделяется разработке различных технических решений и исследованию режимов работы фазоповоротных устройств [6-13].

Настоящая работа посвящена разработке математической модели модифицированного двухтрансформаторного схемного варианта фазорегулирующего устройства, на основе классической однитрансформаторной схемы «Delta Connection».

Общая характеристика объекта исследования

На рис.1 представлена схема рассматриваемого в работе варианта фазорегулирующего устройства, с нанесенной на нее информацией по обмоткам и напряжениям в характерных точках. На схеме рис.2 показано распределение токов по обмоткам устройства. Основными элементами устройства являются два силовых трансформатора, один из которых выполняет функции параллельного (или намагничивающего), другой – функции последовательного (или фазосдвигающего) элемента. Индексом «*p*» помечены обмотки и соответствующие электрические величины, характеризующие режим намагничивающего трансформатора, индексом «*q*» - обмотки и электрические величины фазосдвигающего трансформатора.

Обмотка высокого напряжения фазосдвигающего трансформатора W_{1q} имеет среднюю точку «*m*». К ней подключен высоковольтный вывод обмотки W_{1p} намагничивающего трансформатора. Такой вариант включения позволяет добиться стабильности выходного напряжения в процессе регулирования угла ψ .

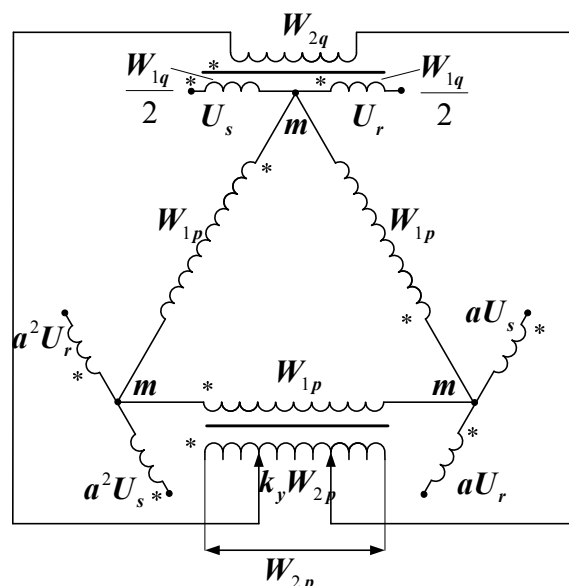


Рис.1. Схема фазорегулирующего устройства с обозначением обмоток и напряжениями в характерных точках.

Изменение угла фазового сдвига между входом U_s и выходом U_r устройства осуществляется путем взаимного перемещения регулировочных контактов на обмотке низкого напряжения W_{2p} .

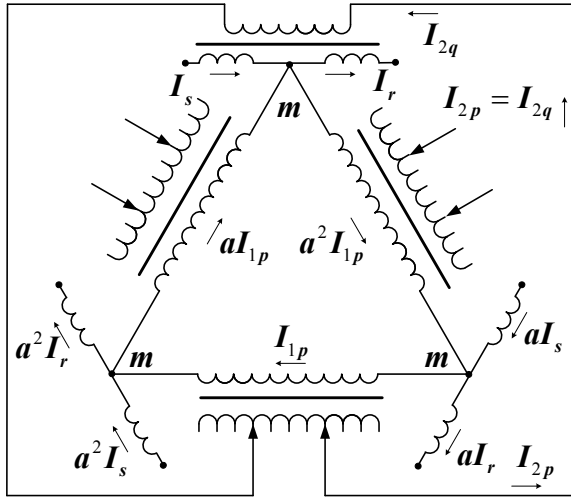


Рис.2. Распределение токов по обмоткам устройства.

Основные уравнения параметров режима

Исходя из рис.1,2 может быть записано уравнение электромагнитного баланса фазосдвигающего трансформатора:

$$I_s \frac{W_{1q}}{2} + I_r \frac{W_{1q}}{2} = I_{2q} W_{2q}. \quad (1)$$

Ток вторичной обмотки фазосдвигающего элемента согласно (1):

$$I_{2q} = \frac{I_s + I_r}{2k_q}, \quad (2)$$

где k_q коэффициент трансформации:

$$k_q = \frac{W_{2q}}{W_{1q}}.$$

Токи на входе и выходе фазорегулирующего трансформатора будут равны между собой по модулю исходя из условия равенства модулей входного и выходного напряжений. Эти токи будут отличаться только по фазе. Таким образом, связь между входным I_s и выходным I_r токами характеризуется следующим образом:

$$I_r = I_s e^{j\psi} \quad (3)$$

Следовательно, выражение для токов вторичной обмотки (2) фазорегулирующего трансформатора:

$$I_{2q} = \frac{1 + e^{j\psi}}{2k_q} I_s$$

или

$$I_{2q} = \frac{\cos \frac{\psi}{2}}{k_q} e^{j\frac{\psi}{2}} I_s. \quad (4)$$

Модуль тока во вторичной обмотке фазосдвигающего элемента, учитывая (4), выражается соотношением:

$$|I_{2q}| = \frac{\cos \frac{\psi}{2}}{k_q} I_s$$

Для узла «m» системы обмоток высокого напряжения можно записать:

$$I_s + aI_{1p} = I_r + a^2I_{1p}.$$

Отсюда, выражение для тока первичной обмотки намагничивающего элемента примет вид:

$$I_{1p} = \frac{I_s - I_r}{a - a^2},$$

или

$$I_{1p} = j \frac{I_s - I_r}{\sqrt{3}}.$$

Указанные соотношения с учетом (3) может быть представлено следующим образом:

$$I_{1p} = j \frac{I_s - I_r}{\sqrt{3}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sin \frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} I_s. \quad (5)$$

Соответственно ток I_{2p} во вторичной обмотке намагничивающего элемента, с учетом (2) и (4) будет определяться выражением:

$$I_{2p} = I_{2q} = \frac{I_s + I_r}{2k_q} = \frac{\cos \frac{\psi}{2}}{k_q} e^{j\frac{\psi}{2}} I_s. \quad (6)$$

Коэффициент трансформации намагничивающего элемента (k_{pf}) может быть определен как:

$$k_{pf} = k_y k_p = \frac{I_{1p}}{I_{2p}} = j \frac{2}{\sqrt{3}} k_q \frac{I_s - I_r}{I_s + I_r} = \frac{2}{\sqrt{3}} k_q \operatorname{tg} \frac{\psi}{2}. \quad (7)$$

Отсюда

$$\operatorname{tg} \frac{\psi}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{k_p}{k_q} k_y = k_y \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2}$$

При $k_y = 1$ получаем:

$$\operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{k_p}{k_q}$$

или $k_p = \frac{2}{\sqrt{3}} \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2} \cdot k_q$.

Из соотношения (7) также следует

$$j \frac{I_s - I_r}{I_s + I_r} = \operatorname{tg} \frac{\psi}{2}.$$

Отсюда может быть получена связь между выходным I_r и входным I_s токами рассматриваемого устройства:

$$I_r = \frac{1 + j k_y \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2}}{1 - j k_y \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2}} I_s. \quad (8)$$

Величина

$$\dot{K} = \frac{1 + j k_y \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2}}{1 - j k_y \operatorname{tg} \frac{\psi_{\max}}{2}} \quad (9)$$

является комплексным коэффициентом преобразования как по току, так и по напряжению, что характерно для фазорегулирующего трансформатора [14].

Векторные диаграммы токов, поясняющие работу фазорегулирующего устройства, при характерных значениях углов фазового сдвига $\psi = 30^\circ$ и $\psi = 60^\circ$ приведены соответственно на рис.3 и рис. 4

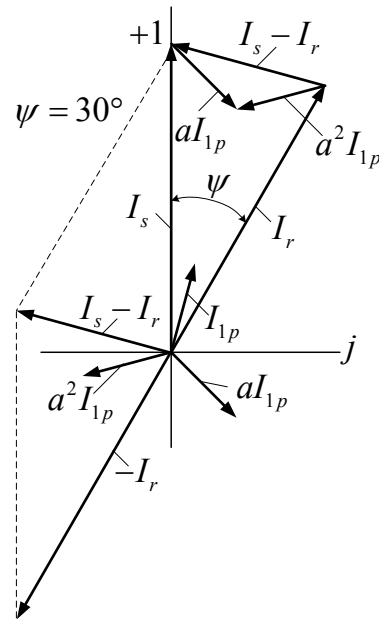


Рис.3. Векторная диаграмма токов при угле фазового сдвига $\psi = 30^\circ$.

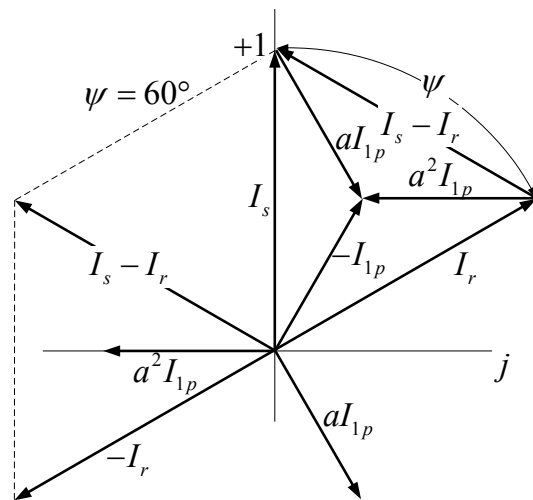


Рис.4. Векторная диаграмма токов при угле фазового сдвига $\psi = 60^\circ$.

Далее определим характер изменения напряжений на обмотках возбуждающего и фазосдвигающего элементов фазорегулирующего устройства.

Напряжение в узле «m» описывается соотношением:

$$U_m = U_s \cos \frac{\psi}{2} e^{j \frac{\psi}{2}} \quad (10)$$

С учетом (10) напряжение на первичной обмотке намагничивающего элемента:

$$U_{1p} = -j\sqrt{3}U_m = -j\sqrt{3} \cos \frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} U_s, \quad (11)$$

а его модуль:

$$|U_{1p}| = \sqrt{3} \cos \frac{\psi}{2} U_s. \quad (12)$$

Напряжение на вторичной обмотке намагничивающего элемента:

$$\begin{aligned} U_{2p} &= k_y k_p U_{1p} = \frac{2}{\sqrt{3}} k_q t g \frac{\psi}{2} U_{1p} = \\ &= -j k_q \sin \frac{\psi}{2} e^{j\frac{\psi}{2}} U_s. \end{aligned} \quad (13)$$

Модули напряжений вторичных обмоток описываемого устройства и первичной обмотки фазосдвигающего элемента определяются выражениями:

$$|U_{2p}| = 2k_q \sin \frac{\psi}{2} U_s, \quad (14)$$

$$|U_{2q}| = |U_{2p}| = 2k_q \sin \frac{\psi}{2} U_s, \quad (15)$$

$$|U_{1q}| = \frac{|U_{2q}|}{k_q} = 2 \sin \frac{\psi}{2} U_s. \quad (16)$$

Характер изменения модулей токов в обмотках возбуждающего элемента:

$$|I_{1p}| = \frac{2}{\sqrt{3}} \sin \frac{\psi}{2} I_s,$$

$$|I_{2p}| = \frac{\cos \frac{\psi}{2}}{k_q} I_s;$$

фазосдвигающего элемента:

$$|I_{1q}| = I_s,$$

$$|I_{2q}| = \frac{\cos \frac{\psi}{2}}{k_q} I_s.$$

Для определения расчетной мощности ФРТ используются максимальные значения модулей соответствующих токов и напряжений. Так, для возбуждающего элемента ФРТ:

$$S_p = \frac{|U_{1p(\max)}| |I_{1p(\max)}| + |U_{2p(\max)}| |I_{2p(\max)}|}{2},$$

а для фазосдвигающего элемента:

$$S_q = \frac{|U_{1q(\max)}| |I_{1q(\max)}| + |U_{2q(\max)}| |I_{2q(\max)}|}{2}.$$

Полная расчетная мощность устройства ФРТ $S_{ФРТ} = S_p + S_q$ представляет собой сумму расчетных мощностей возбуждающего и фазосдвигающего элементов

Выводы

1. Благодаря модификации однотрансформаторного фазорегулирующего устройства, выполненного на основе классической схемы «Delta Connection», появилась возможность перенести управление углом фазового сдвига на низком напряжении, что позволяет существенно снизить затраты на изоляцию регулировочной обмотки, следствием чего становится возможным использование предлагаемого устройства в сетях с высоким номинальным напряжением.

2. Построена математическая модель, описывающая параметры режима фазорегулирующего трансформатора в процессе регулирования угла. Полученные в ходе расчетных экспериментов результаты могут быть использованы для сравнительного анализа при определении технико-экономической эффективности разрабатываемых в перспективе фазоповоротных устройств трансформаторного типа.

Литература (References)

- [1] FACTS-Devices and Applications, Xiao-Ping Zhang, Christian Rehtanz, Bikash Pal Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, Power Systems 2012, pp 1-30.
- [2] Kling W., Klaar D., Schuld J. and other, Phase shifting transformers installed in the Netherlands in order to increase available international transmission capacity, CIGRE 2004, C2-207, 21, rue d'Artois, F-750.
- [3] Belivanis, M.; Bell, K.R.W., Use of phase-shifting transformers on the Transmission Network in Great Britain, Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2010 45th International. Publication Year: 2010, Page(s): 1 – 5

- [4] Hurlet P., Riboud J-C., Margoloff J., Tanguy A.. French Experience in Phase-Shifting Transformers, CIGRE 2006 , Paper A2-2004.
- [5] Japanese Experience with the use of Phase-Shifting transformers. Makoto Kadowaki – Hitachi Ltd.; Kazuhito Dobashi – Tohoku Electric Power Company ID074. Switzerland, 8 - 14 september 2013.
- [6] L.Calinin, D.Zaițev, M.Țișu, V.Berzan, D.Ylatanovici. Using of capacitor bank in combination with classical two-core phase shift installation. Review Energy Technologies generation, transmission and distribution of electric and thermal energy nr.(8),2011, <http://www.icemenerg.ro> (дата посещения сайта 09.02.2016)
- [7] Calinin L., Zaițev D., Țișu M., Berzan V., Caracteristicile energetice ale transformatorului de reglare a decalajului de fază modificat. Revista electronică „Problemele energeticii regionale”, nr.3(17), 2011. http://journal.ie.asm.md/assets/files/m71_2_182.doc (дата посещения сайта 09.02.2016).
- [8] Țișu M., Calinin L., Zaițev D., Berzan V., Phase-shift transformer with improved characteristics. 9th World Energy System Conference, June 28-30 2012, Suceava, România <http://www.agir.ro/buletine/1417.pdf>. (in Romanian).
- [9] A.Kramer, J.Ruff, Transformers for Angle Regulation Considering the Selection of On-Loas Tap-Changers, IEEE transactions on power delivery, Vol.13, No.2, April 1998, Page(s):518-525.
- [10] Luiz A. C. Lopes, Geza Joos, Boon-Teck Ooi, “A High-Power PWM Quadrature Booster Phase Shifter Based on a Multimodul AC Controller”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.13, No.2, March 1998.
- [11] Stelimakov V., Zhmurov V., Tarasov A., Grinshteyn B., [Phase rotation device thyristor-controlled.]. Fazopovorotnye ustroystva s tiristornym upravleniem, Energetik, 2010, №8, str.20-23 (in Russian).
- [12] Zhmurov V., Stelimakov V., Tarasov A., Grinshteyn B., [The use of phase rotation devices with thyristor controlled at high angles of adjustment of the phase shift]. Primenenie fazopovorotnikh ustroystv s tiristornym upravleniem pri bolshikh uglakh regulirovania fazovogo sdviga, Izvestia Akademii Nauk Energetika, 2010 №5, str.132-141. (in Russian).
- [13] Kling W., D.Klaar, J. Schuld and other, Phase shifting transformers installed in the Netherlands in order to increase available international transmission capacity, CIGRE 2004, C2-207, 21, rue d’Artois, F-75008 Paris.
- [14] Calinin L., Golub I., Zaițev D., Țișu M., Caracteristicile tehnice principale ale instalației de reglare a decalajului de fază cu două transformatoare. Forumul Regional Al Energiei Pentru Europa Centrala și de Est – FOREN 2014, 15-19 iunie 2014, Romania. (in Romanian).

Сведения об авторах.



Голуб Ирина Владимировна,
irina.golub@mail.ru
Институт Энергетики АНМ. Область научных интересов: режимы энергосистем, управляемые линии электропередачи переменного тока.



Зайцев Дмитрий Александрович,
zaiats@ie.asm.md
Институт Энергетики АНМ, кандидат технических наук. Научные интересы лежат в области исследования режимов энергосистем, содержащих гибкие межсистемные связи.



Зубарева Ирина Геннадьевна
lovely_19kiss@mail.ru
Студент ИТИ ПГУ им. Т.Шевченко. Область научных интересов: режимы энергосистем, управляемые линии электропередачи переменного тока.