

Ф. П. ГОВОРОВ, д-р техн. наук, проф. ХНУГХ им. А. Н. Бекетова;
В. Ф. ГОВОРОВ, научн. сотр. ХНУГХ им. А. Н. Бекетова;
О. В. КОРОЛЬ, научн. сотр. ХНУГХ им. А. Н. Бекетова

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ВОЛЬТОДОБАВОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ЭЛЕКТРОННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ В СОСТАВЕ ESS

Введение. Концепция так называемых, интеллектуальных энергетических систем (ESS) в Украине породила ряд вопросов. Один из них касается недостаточности технического обеспечения мероприятий. К сожалению, со времени последней кампании автоматизации распределительных сетей, проходившей около 50 лет назад, существенных изменений не произошло. Еще тогда была отмечена невозможность решения задачи, без применения технических средств автоматического управления и регулирования, которые выполняют функции активных элементов (АЭ) ESS. Однако, задача по их созданию до сих пор, не решена. Поэтому указанная проблема остается актуальной и по сей день. Поэтому, разработки посвященные созданию активных элементов ESS, актуальны и являются важным направлением повышения эффективности ESS.

Постановка задач. Как отмечено в [1] активные элементы являются важнейшими элементами интеллектуальных энергетических систем, определяющими возможность и условия их эффективного функционирования. Степень их совершенства в значительной степени определяет эффективность функционирования ESS, в целом. Поэтому, обеспечение условий надежной и экономической работы активных элементов, является важной задачей повышения эффективности работы ESS.

Важное место среди АЭ занимают устройства силовой электроники, выполненные на базе вольтодобавочных трансформаторов (ВДТ) с электронным управлением. Их применение в электрических сетях среднего и низкого напряжения в сочетании с применением плавного либо плавно-ступенчатого способа управления в состоянии значительно расширить функциональные возможности ESS, эффективность и качество функционирования электрических сетей и, подключенных к ним, потребителей. Однако, в силу особенностей схемы присоединения ВДТ к сети имеет место ряд особенностей его работы совместно с электронными управляющими элементами. Это относится к характеру изменения ЭДС и токов в его обмотках. Их наличие обуславливает снижение надежности и экономичности работы ВДТ и, подключенных к ним, потребителей. Изложенное делает необходимым исследование особенностей работы ВДТ с электронными управляющими элементами в составе ESS и определение условий их надежной и экономической совместной работы.

Анализ публикаций. Исследованием работы ВДТ в той или иной постановке задачи в различные годы занимались Шидловский А.К., Кузнецов В.Г., Липковский К.А., Новский В.А. и др. [2-4]. Их работы посвящены, в большинстве своем, исследованиям статических режимов ВДТ. В это же время наличие особенностей квазиустановившихся режимов ВДТ и их существенное влияние на надежность и качество работы ESS требуют проведения дополнительных их исследований.

Расчетно - теоретическое исследование работы ВДТ с тиристорным ключом на первичной стороне. Работа ВДТ с тиристорным ключом в сочетании с наиболее распространенным время-импульсным способом управления и естественным гашением тиристоров, характеризуется наличием ряда особенностей, связанных с изменением величины и длительности протекания токов в обмотках в зависимости от режимов работы и параметров цепи первичной и вторичной обмоток. В рассматриваемых условиях, очевидным является тот факт, что если длительность протекания тока I_1 превышает угол π , то при углах регулирования вентилей $\alpha < \pi - \beta$, где β - угол включенного состояния тиристора, подача управляющего напряжения на включаемый тиристор произойдет в момент, когда напряжение на тиристоре равно нулю, либо имеет обратную полярность, последний отключится. В то же время, отсутствие тока в предшествующий полупериод, создает возможность для успешного включения другого из группы встречно-параллельно включенных тиристоров в последующий полупериод, независимо от соотношения между α и β . В результате трансформатор переходит в режим одностороннего подмагничивания, который характеризуется включением одного из группы встречно-параллельно включенных тиристоров и значительным увеличением первичного тока I_1 . При этом, в следствии насыщения магнитной системы, увеличится длительность протекания тока I_1 в первичной обмотке и возврат трансформатора в нормальный режим станет возможным уже при другом угле $\alpha > \alpha$.

Соответственно, при $\alpha > \pi - \beta$ на участке полупериода, равном $\pi - \beta$ тиристоры находятся в состоянии малой проводимости ($r_T = 1 \div 10$ кОм) и трансформатор работает в режиме холостого хода (ХХ) с питанием по вторичной цепи. Работа ВДТ этом режиме определяется величиной напряжения U_2 , модулем и фазой сопротивления вторичной цепи $\square_{2П}$. Измерения ЭДС и токов в обмотках ВДТ при $\alpha < \pi - \beta$ и $\alpha > \pi - \beta$ свидетельствуют о значительном (до четырех крат) увеличении напряжения на тиристорах, при $\alpha > \pi - \beta$, и многократном (до ста крат) увеличении тока I_1 , при $\alpha < \pi - \beta$. В связи со снижением технико-экономических показателей ВДТ, появлением в обмотках импульсов напряжения и тока большой величины, работа трансформатора в рассмотренных условиях является аварийной.

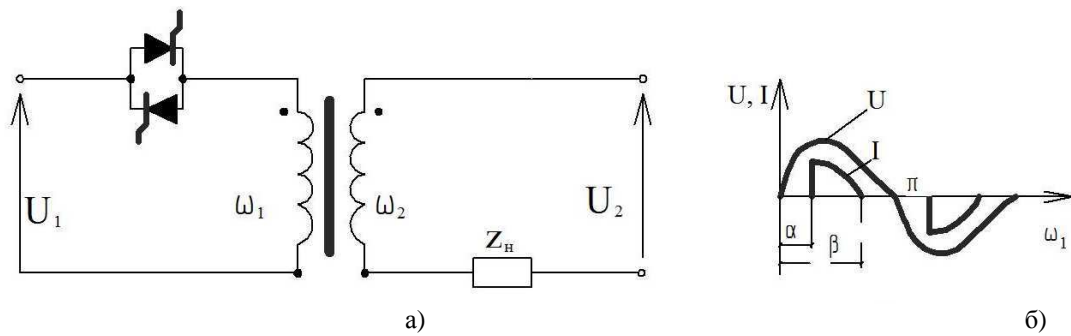


Рис.1 Схема (а) и характер измерения тока I в цепи первичной обмотки (б) ВДТ с тиристорным управлением

В соответствии с изложенным, условие надежной работы ВДТ с тиристорами в цепи первичной обмотки может быть записано в виде: $\alpha \geq \pi - \beta + \gamma$, где: γ - угол удержания вентилей. При этом, угол включения вентилей $\alpha = \pi - \beta + \gamma$ является критическим ($\alpha_{кр}$). При уменьшении угла включения вентилей до величины $\alpha < \alpha_{кр}$ или увеличении длительности протекания тока β в цепи первичной обмотки до величины $\beta > \pi + \alpha - \gamma$ трансформатор переходит в один из аварийных режимов: дроссельный или одностороннего подмагничивания.

Основные количественные соотношения, характеризующие работу ВДТ в этих режимах получены использованием схемы замещения рис. 2 а. Процессы в схеме замещения описываются системой линейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} U_1 &= i_1 r_{1\Pi} + L_{\sigma 1\Pi} \frac{di_1}{dt} + L_m \frac{di_0}{dt} \\ U'_2 &= i'_2 r'_{2\Pi} + L_m \frac{di_0}{dt} \\ i_0 &= i_1 + i'_2 \end{aligned} \quad (1)$$

После эквивалентных преобразований схема рис. 2а преобразуется в более простой вид исходя из следующих допущений (рис. 2б): $Z_H \approx r_H$; $R_H = (r'_2 + r_H) \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2$;

$$U_{\mathcal{E}} = \frac{U'_2 x_m^2}{R_H'^2 + x_m^2}; \quad Z_{\mathcal{E}} = \frac{R_H' x_m}{R_H' + x_m} = \frac{R_H' x_m^2 + R_H'^2 x_m}{R_H'^2 + x_m^2}.$$

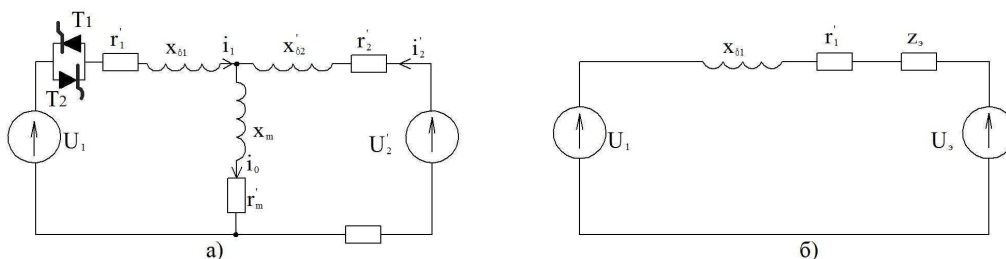


Рис. 2

Для оценки влияния режимов работы и параметров ВДТ на значение угла включения вентилей α в квазиустановившихся режимах достаточным является частное решение (1) в виде:

$$I_1 = \frac{\left[\pm U_1 (R_H'^2 + x_m^2) + U'_2 x_m^2 + U'_2 R_H' x_m \right]}{(R_H' x_m^2 - x_m^2 r_{1\Pi} + R_H'^2 r_{1\Pi}) + (R_H' x_m + x_{\sigma 1} x_m^2 + R_H'^2 x_{\sigma 1})} \quad (2)$$

Откуда

$$\alpha_{кр} = \arctg \frac{(R_H' x_m^2 - x_m^2 r_{1\Pi} + R_H'^2 r_{1\Pi}) - \left[\pm U_1 (R_H'^2 + x_m^2) + U'_2 x_m^2 \right] \times (R_H'^2 x_m + x_{\sigma 1} x_m^2 + R_H'^2 x_{\sigma 1})}{\left[\pm U_1 (R_H'^2 + x_m^2) + U'_2 x_m^2 \right] \times (R_H' x_m^2 - x_m^2 r_{1\Pi} + R_H'^2 r_{1\Pi}) + U'_2 R_H' x_m (R_H' x_m + x_{\sigma 1} x_m^2 + R_H'^2 x_{\sigma 1})} \quad (3)$$

Как следует из (3) $\alpha_{кр}$ является знакопеременной функцией параметров $U_1, U_2, R_n, x_m, r_{1П}, x_{\sigma 1}$ и изменяется с изменением режимов работы ВДТ, величины нагрузки и состояния магнитной системы. При этом в режиме встречного включения при $U_1(R_n^2 + x_m^2) \geq U_2 x_m^2$ угол $\alpha_{кр} > 0$, что соответствует опережающему току I_1 . В режиме малых нагрузок ($R_n \rightarrow \infty$) сопротивление нагрузки не влияет на характер тока I_1 и значение $\alpha_{кр}$ определяется значением x_m (состоянием магнитной системы)

$$\alpha_{кр} \approx \arctg \frac{x_m}{r_{1П}} \quad (4)$$

При ненасыщенной магнитной системе $x_m > r_{1П}$ и $\alpha_{кр} \approx 0$. С увеличением насыщения $\alpha_{кр} > 0$. Соответственно, при больших нагрузках, когда $R_n \rightarrow 0$, влияние намагничивающего контура на характер изменения тока I_1 уменьшается и $\alpha_{кр}$ определяется главным образом параметрами первичной цепи

$$\alpha_{кр} = \arctg \frac{x_{\sigma 1}}{r_{1П}} \quad (5)$$

При номинальных нагрузках в зависимости от характера соотношения $R_n > r_{1П}$ следует рассматривать работу ВДТ при насыщенной и ненасыщенной магнитной системе.

В первом случае сопротивление намагничивающего контура x_m значительно больше сопротивления нагрузки, его влиянием в первом приближении можно пренебречь и рассматривать схему в виде последовательно соединенных $U_1, U_2, R_n, x_m, r_{1П}, x_{\sigma 1}$ (см. рис. 2 б).

В этом случае

$$\alpha_{кр} \approx \arctg \frac{x_{\sigma 1}}{r_{1П} + R_n'} \quad (6)$$

Во втором случае, сопротивление намагничивающего контура соизмеримо с сопротивлением нагрузки R_n' и оказывает существенное влияние на характер тока I_1 . Пренебрегая влиянием параметров первичной цепи ($r_{1П}, x_{\sigma 1}$), схему замещения можно рассматривать в виде параллельно соединенных сопротивлений x_m и R_n' . Угол включения, при этом, определится, как

$$\alpha_{кр} \approx \arctg \frac{R_n'}{x_m} \quad (7)$$

Таким образом, критический угол включения тиристоров $\alpha_{кр}$ не является постоянным, а изменяется с изменением режимов работы и параметров ВДТ. Значения $\alpha_{кр}$ при различном сочетании режимов работы и параметров ВДТ могут быть определены по (3). При этом, поскольку тиристор заперт, $r_{1П} \approx 0$ и значение критического угла возврата определяется, практически параметрами вторичной цепи

$$\alpha_{кр} \approx \arctg \frac{R_n'}{x_m} \quad (8)$$

В соответствии с изложенным, в связи со значительным изменением сопротивления x_m намагничивающего контура при кратковременной потере импульсов либо увеличении длительности прохождения тока I_1 до $\beta_{кр} = \pi - \alpha + \gamma$, трансформатор переходит в режим одностороннего подмагничивания.

Графические зависимости $\alpha_{кр} = f(R_n, x_m, r_{1П}, x_{\sigma 1})$, полученные в результате расчета по (3), приведены на рис. 2. Кривая $\alpha_{кр} = f(x_m)$ характеризует зависимость критического угла от состояния магнитной системы и может быть использована для определения значений критического угла возврата $\alpha_{кр}$. Как следует из рис. 3, значение критического угла возврата увеличивается с увеличением насыщения магнитной системы и стремится в предельном случае к π , при согласном включении ВДТ, и к $-\pi$ - при встречном. Различие в характере кривых $\alpha = f(x_m)$ для различных режимов можно объяснить различным характером взаимодействия токов I_1 и I_0 . В режиме согласного включения ток I_0 сдвинут относительно тока I_1 на угол близкий к $+\pi/2$ обуславливает сдвиг последнего на угол ϕ_1 , в сторону отставания. Соответственно, в режиме встречного включения сдвиг тока I_0 составляет угол, близкий к $-\pi/2$ и влияние сказывается на сдвиге тока I_1 в сторону опережения.

В режиме встречного включения, сопротивление R_n включено последовательно с эквивалентным сопротивлением первичной цепи и его влияние выражается в уменьшении индуктивной составляющей результирующего тока, поскольку при последовательном соединении $\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}$

Аналогично объясняется характер кривых $\alpha_{кр} = f(x_{\sigma 1})$ с той лишь разницей, что в режиме согласного включения $x_{\sigma 1}$ оказывается включенным последовательно с эквивалентным сопротивлением вторичной цепи, увеличивая реактивную составляющую тока I_1 . По той же причине, в режиме встречного включения, сопротивление $x_{\sigma 1}$ вызывает уменьшение критического угла включения $\alpha_{кр}$ в связи с подключением его параллельно с сопротивлением намагничивающего контура x_m . Наличие точки с $\alpha_{кр} = 0$ и изменение знака $\alpha_{кр}$ объясняется влиянием сопротивления $r_{1П}$. Точке $\alpha_{кр} = 0$ соответствует значение $x_{\sigma 1}$ равное

$$x_{\sigma 1} = \sqrt{\frac{x_m^2 - r_{1П}^2}{\sin \phi_1}} \quad (9)$$

при котором ток I_1 находится в противофазе с током I_0 . Дальнейшее увеличение $x_{\sigma l}$ приводит к тому, что ток I_1 оказывается сдвинутым на угол, больший π по отношению к току I_0 и влияние I_0 можно рассматривать, как сдвиг тока I_1 в сторону отставания.

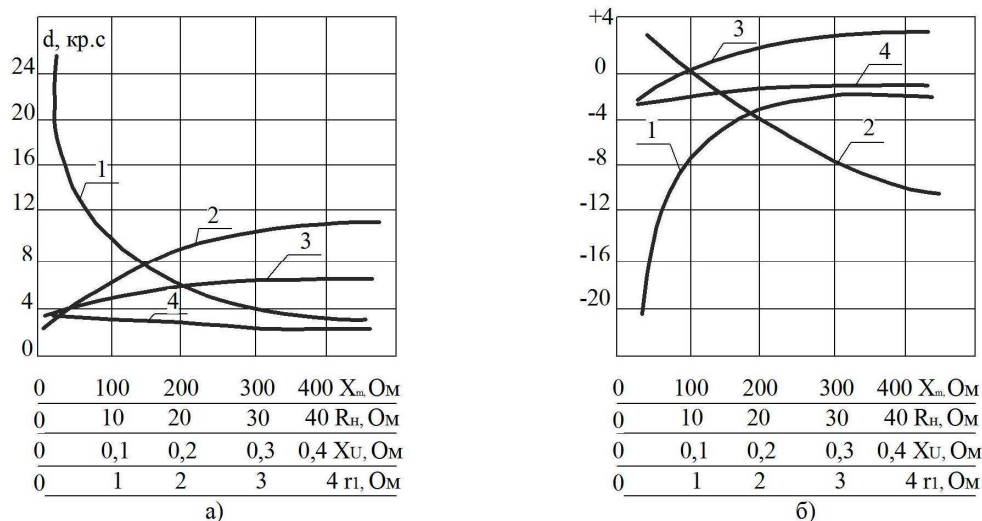


Рис. 3 Графические зависимости критического угла включения тиристоров $d_{кр}$ от сопротивления намагничивающего контура x_m (1), сопротивления нагрузки R_n (2), сопротивления рассеяния (3), активного сопротивления первичной обмотки r_1 (4) для режима согласного (а) и встречного (б) включения ВДТ

Выводы: Проведенные исследования свидетельствуют, что для обеспечения надежной и экономичной работы ВДТ в составе ESS в квазиустановившихся режимах необходим учет наличия и характера изменения критического угла отпирания тиристоров с изменением нагрузки, режимов работы и параметров ВДТ. Последнее требует применения специальных схем управления с синхронизацией управляющего напряжения от тока и напряжения тиристоров.

Список литературы: 1. Назаров В.В. Концепция Smart Grid и реальная энергетика // Энергетика и электрофикация, 2013, №6, с. 12-15. 2. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях // Наукова Думка, 1985, с. 268 с. 3. Новский В.А., Голубев В.В., Козлов А.В., Бойко П.С. Быстродействующее уравнивание трехфазной четырехпроводной системы с помощью трансформаторно-ключевых преобразователей // Техн. електродинаміка. Тем. випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – 2007. – Ч. 3. – С. 7-12. 4. Липківський К.О. Оптимізація розрахункових характеристик виконавчих структур дискретних стабілізаторів напруги // Праці ІЕД НАНУ. – 2006. - №2(14). – С. 98-99.

Bibliography (transliterated): 1. Nazarov V.V. Kontseptsiya Smart Grid I real'naya energetika // Energetika I elektrofikatsiya. 2013, №6. 12-15. Print. 2. Shidlovskiy A.K., Kuznetsov V. G. Povysheniye kachestva energii v elektricheskikh setyakh // Naukova Dumka, 1985. 268 p. Print. 3. Novskiy V.A., Golubev V.V., Kozlov A.V., Boyko P.S. Bystrodeystvuyushcheye uravnoveshivaniye trekhfaznoy chetyrehprovodnoy sistemy s pomoshch'yu transformatornoklyuchevykh preobrazovateley // Tekhn. yelektrodinamika. Tem. Vipusk «Silova yelektronika ta yenergoyefektivnist». – 2007. – Ch. 3. 7-12. Print. 4. Lypkivsky K.O. Optymizatsia rozrakhunkovykh kharakterystyk vykonavchyykh struktur dyskretnyykh stabilizatoriv napruhy // Pratsi IED NANU. – 2006. – №2(14). 98-99. Print.

Поступила (received) 31.08.2015