

ВЛИЯНИЕ МЕЖОБМОТОЧНОЙ ЕМКОСТИ НА ТОЧНОСТЬ РАБОТЫ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА

Г.М.Варский, канд. техн. наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.
e-mail: varsky@ied.org.ua

Исследованы процессы, протекающие в цепи нагрузки высоковольтного трансформатора тока с учетом влияния величины первичного напряжения и межобмоточной емкости трансформатора. Получены формулы, которые позволяют находить погрешности трансформатора тока при разных значениях тока, проходящего через емкость его высоковольтной изоляции, и коэффициента реактивной мощности высоковольтной линии. Библ. 3, рис. 3.

Ключевые слова: трансформатор тока, межобмоточная емкость, точность измерений

Повышение точности измерения тока высоковольтной линии электропередачи для обеспечения повышенных требований учета электроэнергии, более точного определения режимных параметров, обеспечения точности векторных измерений и сегодня остается актуальной проблемой, основным путем решения которой является замена трансформаторов тока (ТТ) класса точности 0,5 на трансформаторы класса точности 0,2 и 0,2 S. Кроме того, на современном этапе развития микропроцессорных устройств, применяемых в электроэнергетике, актуальным является путь повышения точности ТТ посредством введения корректирующих поправок в результаты измерения тока, требующего точного определения параметров корректируемого трансформатора и учета дополнительных погрешностей, вызванных различными влияющими факторами [3]. Но при этом мало кто обращает внимание на дополнительную погрешность ТТ, вызванную протеканием через нагрузку ТТ тока через емкость между первичной и вторичной обмотками трансформатора под действием первичного напряжения. Эта дополнительная погрешность существенным образом может снизить эффективность применения ТТ более высокого класса точности и программных или аппаратных средств коррекции погрешности, особенно в области малых токов. Ниже рассматривается влияние тока через межобмоточную емкость трансформатора на погрешности высоковольтного ТТ.

Величина межобмоточной емкости в ТТ определяется его конструктивными особенностями, классом напряжения, на которое он изготовлен, типом обмоток. В [1] приведены ориентировочные значения емкости главной изоляции маслонаполненных ТТ различных типов и схемы замещения их изоляции. Так ТТ со звеньевой обмоткой (трансформаторы серии ТФЗМ) на напряжение 35–150 кВ имеют емкость главной изоляции от 50 до 120 пФ в зависимости от класса напряжения. Указанные ТТ не имеют электростатического экрана между первичной и вторичной обмотками [1], поэтому на электрической схеме эту емкость можно отобразить емкостью C_1 , подключенной к незаземленному выводу I_1 вторичной обмотки w_2 ТТ и одному из выводов, например, J_1 его первичной обмотки w_1 (рис.1).

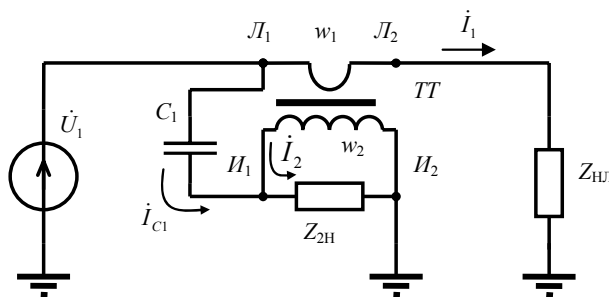


Рис. 1

В этом случае по нагрузке Z_{2H} рассматриваемого ТТ будет проходить ток с комплексным действующим значением $\dot{I}_{2\Sigma}$, равный сумме комплексных значений вторичного тока измерительного трансформатора \dot{I}_2 и емкостного тока \dot{I}_{C1}

$$\dot{I}_{2\Sigma} = \dot{I}_2 + \dot{I}_{C1} .$$

С учетом того, что емкостное сопротивление высоковольтной изоляции ТТ, равно $1/\omega C_1$, намного больше сопротивления нагрузки Z_{2H} , а Z_{2H} , в свою очередь, намного меньше сопротивления ветви намагничивания ТТ, приведенного ко вторичной обмотке w_2 , комплексное значение емкостного тока \dot{I}_{C1} будет равно

$$\dot{I}_{C1} = j\omega C_1 \dot{U}_A = \omega C_1 U_A \angle 90^\circ ,$$

где U_A – действующее значение напряжения сети.

Комплексное значение вторичного тока ТТ может быть представлено в следующем виде:

$$\dot{I}_2 = \frac{1}{n_{ном}} (1 + f_i) I_1 \angle (\varphi + \delta_i) ,$$

где $n_{ном} = I_{1ном}/I_{2ном}$ – номинальный коэффициент трансформации ТТ; $I_{1ном}$ и $I_{2ном}$ – номинальные первичный и вторичный ток ТТ; f_i – токовая погрешность ТТ (в долях); δ_i – угловая погрешность ТТ (в градусах); I_1 – действующее значение первичного тока; φ – угол между напряжением \dot{U}_A и током линии \dot{I}_1 , определяемый коэффициентом реактивной мощности линии $\text{tg } \varphi$.

Погрешность ТТ в условиях эксплуатации в комплексном виде $\dot{\varepsilon}_3$ может быть определена следующим образом:

$$\dot{\varepsilon}_3 = \frac{\dot{I}_{23} - \dot{I}_1}{\dot{I}_1} \cdot 100 = \frac{1}{n_{ном}} (1 + f_i) I_1 \angle(\varphi + \delta_i) + \omega C_1 U_A \angle 90^\circ - \frac{I_1 \angle \varphi}{n_{ном}} \cdot 100\% .$$

После преобразований получим

$$\dot{\varepsilon}_3 = \left\{ (1 + f_i) \cos \delta_i - 1 + \varepsilon_{дс} \sin \varphi + j \left[(1 + f_i) \sin \delta_i + \varepsilon_{дс} \cos \varphi \right] \right\} \cdot 100\% , \quad (1)$$

где $\varepsilon_{дс}$ – дополнительная погрешность, вызванная током через емкость изоляции ТТ,

$$\varepsilon_{дс} = n_{ном} \omega C_1 U_A I_1^{-1} = \omega C_1 U_A I_2^{-1} .$$

Можно показать, что модуль погрешности ТТ в условиях эксплуатации равен

$$\begin{aligned} \varepsilon_3 &= \sqrt{\left[(1 + f_i) \cos \delta_i - 1 + \varepsilon_{дс} \sin \varphi \right]^2 + \left[(1 + f_i) \sin \delta_i + \varepsilon_{дс} \cos \varphi \right]^2} \cdot 100\% = \\ &= \sqrt{\varepsilon^2 + \varepsilon_{дс}^2 + 2\varepsilon_{дс} \left[(1 + f_i) \sin(\varphi + \delta_i) - \sin \varphi \right]} \cdot 100\% = \sqrt{\varepsilon^2 + \varepsilon_{дс}^2 + \varepsilon_{д\varphi}^2} \cdot 100\% , \end{aligned} \quad (2)$$

где $\varepsilon = \sqrt{(1 + f_i)^2 - 2(1 + f_i) \cos \delta_i + 1}$ – полная погрешность ТТ, выраженная через его токовую и угловую погрешности, измеренные в условиях отсутствия влияния высокого напряжения, а

$$\varepsilon_{д\varphi} = \sqrt{2\varepsilon_{дс} \left[(1 + f_i) \sin(\varphi + \delta_i) - \sin \varphi \right]} = \sqrt{2\varepsilon_{дс} f_i \sin \varphi} \quad (3)$$

– дополнительная погрешность, зависящая от угла φ между напряжением и током линии, токовой погрешности ТТ и дополнительной погрешности $\varepsilon_{дс}$, вызванной током через емкость изоляции ТТ.

Таким образом, погрешность ТТ в условиях эксплуатации ε_3 зависит не только от полной погрешности ТТ ε и дополнительной погрешности $\varepsilon_{дс}$, вызванной током через емкость изоляции, но также зависит и от угла φ между напряжением и током линии, определяющим дополнительную погрешность $\varepsilon_{д\varphi}$.

Поскольку величина действующего значения емкостного тока I_{C1} остается практически постоянной, то дополнительная погрешность (1) тем больше, чем выше приложенное к ТТ напряжение, больше емкость его изоляции и меньше вторичный ток трансформатора (рис.2).

Анализ полученных зависимостей показывает, что для рассматриваемых трансформаторов тока серии ТФЗМ на напряжение 35–150 кВ со звеньевой обмоткой и номинальным вторичным током $I_{2ном} = 5\text{А}$ при вторичных токах меньше 20% номинального тока дополнительная погрешность $\varepsilon_{дс}$ становится существенной и превышает границы класса 0,2S для трансформаторов 110–150кВ, а при 5% $I_{2ном}$ превышает границы класса 0,5S и с трудом укладываются в пределы класса 1,0.

Если выполнить ТТ подобной конструкции с номинальным током 1А, то уже при токах ниже 60% номинального дополнительная погрешность будет превышать 1%, а при 5% номинального – 10%. Таким образом, применение ТТ подобной конструкции с основной погрешностью, отвечающей классу точности 0,2S и 0,5S, призванных, в первую очередь, обеспечить точность измерений в области малых токов (1–20)% $I_{2ном}$, будет нивелироваться из-за дополнительной погрешности $\varepsilon_{дс}$, обусловленной током через емкость высоковольтной изоляции измерительного трансформатора, а ее не учет при коррекции погрешности ТТ не позволит получить ожидаемый результат и может привести к увеличению суммарной погрешности. Данное обстоятельство, кроме технологических причин и условий помехозащищенности, также может служить дополнительным объяснением, почему в современных условиях широкого применения микропроцессорной техники в электроэнергетике, не требующей значительных мощностей по измерительным цепям, электромагнитные измерительные ТТ продолжают выполнять с номинальным вторичным током 5А. Таким образом, минимальная величина вто-

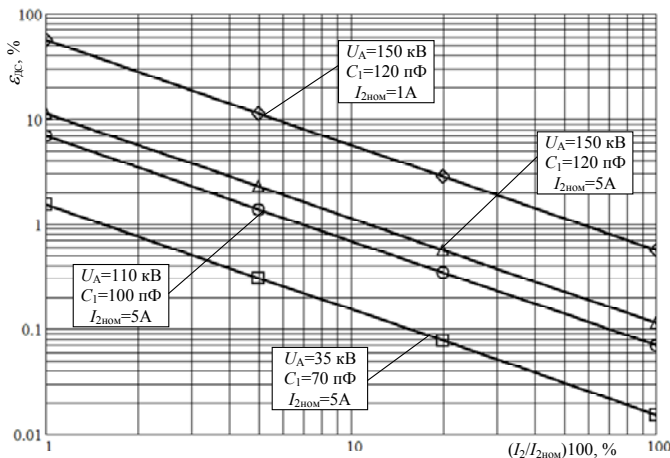


Рис. 2

ной изоляции измерительного трансформатора, а ее не учет при коррекции погрешности ТТ не позволит получить ожидаемый результат и может привести к увеличению суммарной погрешности. Данное обстоятельство, кроме технологических причин и условий помехозащищенности, также может служить дополнительным объяснением, почему в современных условиях широкого применения микропроцессорной техники в электроэнергетике, не требующей значительных мощностей по измерительным цепям, электромагнитные измерительные ТТ продолжают выполнять с номинальным вторичным током 5А. Таким образом, минимальная величина вто-

ричного номинального тока ТТ, кроме требований нормативных документов, ограничена наличием дополнительной погрешности в реальных условиях эксплуатации, вызванной влиянием напряжения высоковольтной линии, в которой установлен ТТ.

Величина дополнительной погрешности $\varepsilon_{D\varphi}$ зависит от $\varepsilon_{ДС}$, f_i и определяется режимом работы линии: чем больше коэффициент реактивной мощности $\operatorname{tg}\varphi$, т.е. угол между напряжением и током линии, тем больше ее значение. Для линий 110-150 кВ значение $\operatorname{tg}\varphi$ не должно превышать 0,5. Максимальное значение $\varepsilon_{D\varphi}$ будет достигаться при соответствующем угле $\varphi=26,57^\circ$.

Проверка влияния напряжения линии на полную погрешность ТТ и правильность полученных выражений проводилась на модели ТТ, реализованной в системе схемотехнического моделирования ORCAD. Характеристика намагничивания ТТ с учетом гистерезиса моделировалась с использованием встроенной модели Джилса-Атертона. ТТ типа ТФЗМ150А-ІУ1(ТФНД-150-І) имеет следующие параметры сердечника и обмоток для измерений: поперечное сечение магнитного сердечника $Q=18 \text{ см}^2$, длина средней магнитной линии $l_{cp}=0,8 \text{ м}$,

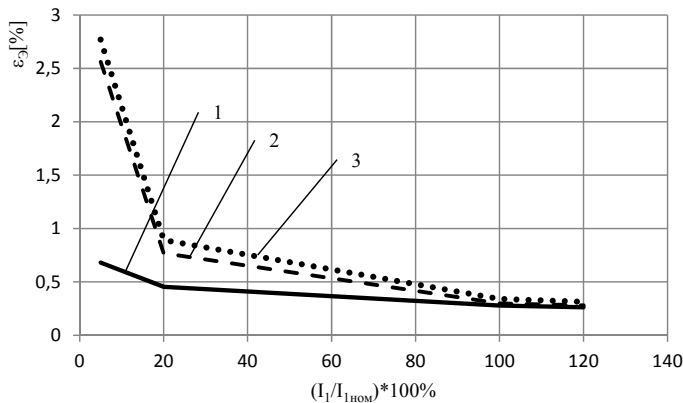


Рис. 3

число витков первичной обмотки $w_1=1$, число витков вторичной обмотки $w_2=240$, активное и реактивное сопротивление вторичной обмотки $r_{2обм}=0,34 \text{ Ом}$, $x_{S2}=0,53 \text{ Ом}$, номинальная вторичная нагрузка $S_{2ном}=40 \text{ ВА}$, при $\cos\varphi=0,8$ номинальный первичный ток $I_{1ном}=1200 \text{ А}$, номинальный вторичный ток $I_{2ном}=5 \text{ А}$, номинальное напряжение $U_{ном}=150 \text{ кВ}$, материал магнитного сердечника – электротехническая сталь 3413, величина межобмоточной емкости $C3=120 \text{ пФ}$ [1,2]. Кривая 1 на рис.3 – полная погрешность ТТ без учета влияния напряжения линии, кривая 2 – погрешность ТТ с учетом влияния напряжения линии при $\operatorname{tg}\varphi=0$ ($\varphi=0$), кривая 3 – погрешность ТТ с учетом влияния напряжения линии

при $\operatorname{tg}\varphi=0,5$ ($\varphi=26,57^\circ$). Результаты моделирования совпадают с расчетами погрешности ТТ по формулам (1)–(3).

1. Бажанов С.А. Маслонаполненные трансформаторы тока. – Москва.: Энергоатомиздат, 1983. – 80 с.

2. Королев Е.П., Либерзон Э.М. Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты. – М.: Энергия, 1980. – 208 с.

3. Стогній Б.С., Сопель М.Ф., Варський Г.М., Яковлева І.В. Підвищення точності вимірювання струмів електроенергетичних об'єктів у реєструючому пристрої «Регіна-Ч» // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – 2012. – Част. 1. – С. 114–119.

УДК 621.317.312: 621.314.224

ВПЛИВ МІЖОБМОТКОВОЇ ЄМНІСТІ НА ТОЧНІСТЬ РОБОТИ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА СТРУМУ

Г.М.Варський, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр.Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

E-mail: varsky@ied.org.ua

Досліджено процеси, що протікають в колі навантаження високовольтного трансформатора струму під дією первинного струму та первинної напруги з врахуванням міжобмоткової ємності трансформатора. Одержано формули, що дозволяють знаходити похибки трансформатора струму при різних значеннях первинного струму та різному коефіцієнті реактивної потужності високовольтної лінії. Бібл. 3, рис. 3.

Ключові слова: трансформатор струму, міжобмоткова ємність, точність вимірювань

INFLUENCE OF INTERWINDING CAPACITANCE ON EXACTNESS OF WORK OF HIGH-VOLTAGE CURRENT TRANSFORMER

G.M.Varskyi

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

E-mail: varsky@ied.org.ua

The processes proceeding in the secondary circuit of the high-potential current transformer under the influence of a primary current and primary voltage with the account interwinding capacitance of the transformer are investigated. Expressions for a finding of a error of the current transformer are gained at different meanings of a primary current and different phasor power factor of a high-voltage line. References 3, figures 3.

Key words: current transformer, interwinding capacitance, measurement accuracy

1. Bazhanov S.A. Current oil-filled transformers. – Moskva: Energoatomizdat, 1983. – 80 p. (Rus.)

2. Korolev E.P., Liberzon E.M. Accounts of safe loads in relaying current circuits. – Moskva: Energiia, 1980. – 208 p. (Rus.)

3. Stohnii B.S., Sopol M.F., Varskyi H.M., Yakovlieva I.V. Increase of a measurement accuracy of currents of electropower objects in logger "Regina-Ch" // Tekhnichna Elektrodynamika. Tematychnyi vypusk «Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist». – 2012. – Chastyna 1. – Pp. 114–119. (Ukr)

Надійшла 04.02.2014