УДК 621.317.322

А.И. АРТЕМОВ, к.т.н., доц.
Е.С. АНДРЕЕНКОВ, асп.
(Филиал ФГБОУ ВО "НИУ"МЭИ" в г. Смоленске)

АНАЛИЗ СПОСОБОВ КОМПЕНСАЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Погрешности измерения трансформатором напряжения (ТН) происходят из-за падений напряжения в сопротивлениях обмоток (первичной и вторичных) от протекающих токов. Ток первичной обмотки зависит от сопротивления цепи намагничивания и от вторичной нагрузки, а ток вторичной обмотки – только от нагрузки. При отсутствии нагрузок во вторичных цепях ТН, его погрешности обусловлены током намагничивания и соответствуют погрешностям холостого хода (ХХ). Для определенной конструкции ТН эти погрешности зависят от величины измеряемого (подводимого) напряжения U_1. У ТН изготовленных с использованием С-образных магнитопроводов из современных электротехнических сталей в диапазоне изменения напряжения от 0,05 до 1,9$U_н$ погрешности холостого хода остаются практически неизменными, что подтверждено экспериментальными данными [1, 2].

При увеличении мощности нагрузки ТН погрешности увеличиваются линейно. Допустимые погрешности для ТН устанавливаются в [3]. Для каждого класса точности регламентируются границы величин полной вторичной нагрузки S и её коэффициент мощности $cos\varphi$. Согласно [3] за номинальные и предельные мощности трехобмоточных ТН принимаются суммарные мощности основной и дополнительной обмоток. При подключении нагрузки на дополнительную обмотку падение напряжения в первичной обмотке возрастает и погрешности основной (измерительной) обмотки так же возрастают и ТН может выходить из заданного класса точности.

В результате нормативные документы ограничивают мощность нагрузки ТН до 20% от максимальной мощности, допустимой по условиям нагрева. С другой стороны, при минимальных нагрузках применение догрузочных резисторов [4] увеличивает стоимость установки, т.к. стоимость догрузочных резисторов соизмерима со стоимостью ТН, а также снижает его надежность [2]. Кроме этого установленные [3] границы допустимого изменения погрешностей в диапазоне $\pm\Delta U$ приводят как к возможности недоучета, так и к возможности завышения платежей за отпущенную электроэнергию, выражаемому миллионами рублей. Поэтому задача компенсации погрешностей ТН в широком диапазоне изменения его нагрузок является актуальной.

В ходе данного исследования проведен анализ способов минимизации погрешностей и предлагается устройство обеспечивающее автоматическую компенсацию погрешностей в широком диапазоне изменения нагрузок. Рассматривались следующие способы компенсации погрешностей ТН:

1. Витковая коррекция [5], используемая при изготовлении ТН, и полностью компенсирующая погрешности холостого хода. Она переводит преднамеренно ТН в положительную область погрешности от допустимой в заданном классе точности. При этом ТН работает со знакопеременной погрешностью в допустимом для заданного класса точности диапазоне и соответствующей ему нагрузке.

2. Емкостная компенсация погрешностей [6] осуществляется внесением во вторичную цепь конденсаторов, емкостной ток которых компенсирует реактивную составляющую погрешности. Доля погрешности от этой составляющей невелика и зависит от величины индуктивной составляющей сопротивления обмоток X_m, которая значительно ниже активной составляющей (*R:X = 3:1* для современных ТН 6-35кВ), поэтому этот метод неэффективен.

3. Применение вольтодобавочных устройств [7], измеряющих погрешность ТН и изменяющих вторичное напряжение на эту величину. Первые прототипы таких устройств имели ручное управление и эффективно компенсировали амплитудную погрешность, а комплексные устройства компенсации погрешностей значительно усложнившись требовали проведения больших объемов измерений в рабочих условиях применения ТН и квалифицированного персонала для выполнения расчетов по заданному алгоритму. По этим причинам, такие устройства не получили широкого распространения.

В зарубежной практике [8-10] получили распространение электронные схемы, с включением электронных элементов в разрыв цепи вторичной нагрузки ТН. На наш взгляд это снижает надежность вторичной цепи ТН при выходе из строя электронных блоков.

В данном исследовании предлагается оригинальный вариант системы компенсации погрешностей ТН, в которой падения напряжения в обмотках ТН измеряются и добавляются к напряжению вторичной обмотки ТН. Так как погрешности ХХ полностью компенсируются витковой коррекцией, то дальнейшее рассмотрение вопросов компенсации было сосредоточено на компенсации нагрузочных погрешностей.

Предлагаемый способ компенсации погрешностей подразумевает, что к фактическому напряжению во вторичной цепи ТН $\dot{U}_2$ прибавляется напряжение, равное потерям напряжения в обмотках трансформатора $\Delta\dot{U}_н$:

$$\dot{U}_1' = \dot{U}_{2н} = \dot{U}_2 + \Delta\dot{U}_н , \quad (1)$$

$$\Delta\dot{U}_н = \dot{I}_2 Z_m = \dot{I}_2 (R_m + jX_m) . \quad (2)$$

Рассмотрены различные способы реализации этого условия. Был проанализирован вариант, когда вольтодобавка формируется схемой, показанной на рисунке 1.

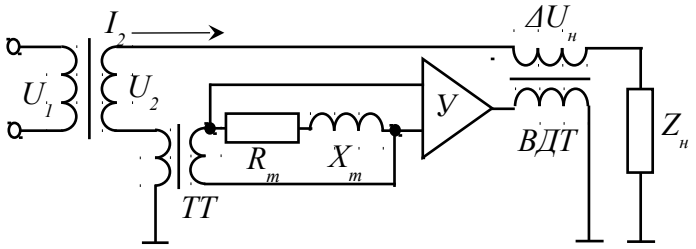

Рисунок 1 – Структурная схема ТН с вольтодобавкой, сформированной нагрузкой вторичной цепи ТТ.

В показанной схеме используется трансформатор тока (ТТ) измеряющий ток $\dot{I}_2$ вторичной обмотки ТН. Во вторичную обмотку ТТ включены сопротивления R_m и X_m, пропорциональные сопротивлениям обмоток ТН. На этих сопротивлениях формируется напряжение, пропорциональное падению напряжения в ТН ($\Delta\dot{U}_н$), которое с помощью коэффициента усиления усилителя *У* и коэффициента трансформации вольтодобавочного трансформатора (ВДТ) выравнивается по амплитуде и фазе с $\Delta\dot{U}_н$ и подается во вторичную цепь ТН. Но исследования показали, что данная схема является неустойчивой автоматизированной системой. Добавка $\Delta\dot{U}_н$ увеличивает напряжение $\dot{U}_2$, возрастает ток $\dot{I}_2$, что приводит к увеличению $\Delta\dot{U}_н$ и т.д., т.е. система уходит в бесконечность.

Далее разрабатывался вариант предусматривающий формирование добавочного напряжения путем сравнения в измерительном операционном усилителе опорного напряжения (равного измеряемому напряжению) и фактического напряжения на нагрузке. В качестве опорного, предлагается напряжение холостого хода дополнительной обмотки $\dot{U}_{3x} = \dot{U}_0$.

Однако при наличии нагрузки основной обмотки, напряжение $\dot{U}_0$ на дополнительной обмотке будет отличаться от значения, когда обе обмотки ТН работают без нагрузки (погрешность равна нулю) и $\dot{U}_0$ не будет равно первичному напряжению $\dot{U}'_1$ в измеряемой сети. Исследования показали, что при наличии нагрузки в основной обмотке (I_{2*}) напряжение ХХ в дополнительной обмотке будет уменьшаться на величину падения напряжения в первичной обмотке ТН от этой нагрузки $-\Delta\dot{U}_{н1}$, что иллюстрирует рисунок 2.

Тогда, опорное напряжение, равное неизвестному нам первичному напряжению U_1 можно формировать путем суммирования $\dot{U}_{3x}$ с падением напряжения в первичной обмотке ТН от нагрузочного тока $\dot{I}_2$ основной обмотки $\Delta\dot{U}_{н1}$:

$$\dot{U}_0 = \dot{U}'_1 = \dot{U}_{3x} + \Delta\dot{U}_{н1}, \quad (3)$$

$$\Delta\dot{U}_{н1} = \dot{I}_2 Z_1 = \dot{I}_2 (R_1 + jX_1), \quad (4)$$

где R_1 – активное сопротивление первичной обмотки; X_1 – индуктивное сопротивление первичной обмотки.

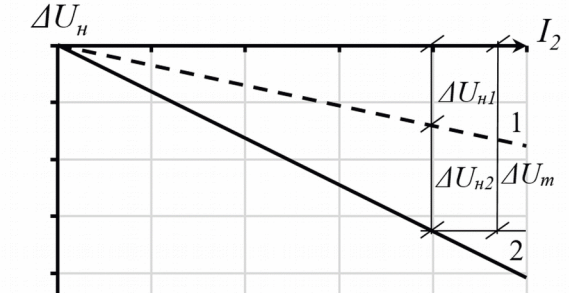

Рисунок 2 – Отклонение напряжения во вторичных обмотках (1, 2) при нагрузке в основной обмотке (2).

Структурная схема, реализующая уточненный алгоритм, приведена на рисунке 3. Напряжение, равное падению напряжения в первичной обмотке ТН $\Delta\dot{U}_{н1}$ в данной схеме реализуется вторичной цепью ТТ, включенным в основную вторичную обмотку. В усилителе $У_1$ образуется напряжение, равное приведенному измеряемому напряжению $\dot{U}_1'$. На усилителе $У_2$ формируется разность напряжения $\dot{U}_1'$ и фактического напряжения на нагрузке $\dot{U}_{2н}$, которая и является необходимой добавкой ЭДС $\Delta\dot{U}_н$. Напряжение вольтодобавки усиливается и передается через ВДТ во вторичную цепь, выполняя условие $\dot{U}_{2н}' = \dot{U}_1$.

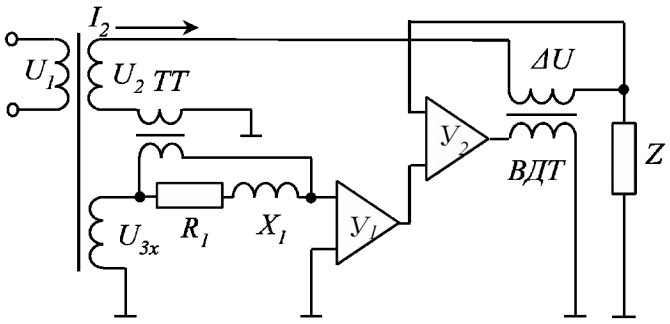

Рисунок 3 – Структурная схема ТН с формированием вольтодобавки сравнением измеряемого напряжения и фактического на нагрузке.

Когда дополнительная обмотка так же нагружена, то в её цепь включается дополнительный ТТ, в котором формируется падение напряжения в обмотках ТН от этой нагрузки и суммируя это напряжение с приведенным ранее подаем на операционный усилитель $\dot{U}_1'$.

Наличие вольтодобавочного трансформатора во вторичной цепи ТН при повреждении электронного блока ТН позволяет сохранить работоспособность ТН, но с некомпенсированными погрешностями. Такое решение обеспечивает работу ТН без снижения надежности.

Выводы:

1. Произведен анализ различных способов компенсации погрешностей трансформаторов напряжения.

2. Разработаны варианты схемных решений автоматической компенсации погрешностей и проведено их компьютерное моделирование

в программном комплексе NI Multisim. Дана оценка всем рассмотренным вариантам и определены наиболее эффективные.

3. Разработан алгоритм автоматической компенсации погрешностей ТН, обеспечивающий компенсацию нагрузочных погрешностей при любом характере нагрузки.

4. Изготовлен макетный образец устройства автоматической компенсации погрешностей ТН и проведены его лабораторные испытания.

Список литературы:

1. Раскулов Р.Ф. Трансформаторы напряжения 3-35 кВ. Метрологические функции первичны [Текст] / Р. Ф. Раскулов // Новости ЭлектроТехники. – 2006. – №6 (42).

2. Раскулов Р. Ф. Трансформаторы напряжения 3–35 кВ Факторы, влияющие на погрешности [Текст] / Р. Ф. Раскулов // Новости ЭлектроТехники. – 2011. – №1(67).

3. ГОСТ 1983-2001. Трансформаторы напряжения. Общие технические условия. М.: Стандартинформ. – 2006.

4. МИ 3023-2006 ГСИ. Нормализация нагрузки вторичных цепей измерительных трансформаторов напряжения. М.: Стандартинформ. – 2006.

5. Дымков А. М. [и др.] Трансформаторы напряжения [Текст] / А. М. Дымков. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975.

6. Малый А. С. Емкостная компенсация погрешностей трансформаторов напряжения [Текст] / А. С. Малый // Электрические станции. – 1991. – №5. – С. 28–34.

7. Артемов А. И. Компенсация погрешностей трансформаторов напряжения 6-10 кВ с помощью вольтодобавочных трансформаторов [Текст] / А. И. Артемов, В. А. Левченков, А. Г. Сидоров // Труды Международного Форума по вопросам науки, техники и образования. Т. 2 / под. ред. В. П. Савиных, В. В. Вишневского – М.: Академия Наук о Земле, 2005. – С. 133–134.

8. P. Sankaran, P. Kanagasabapathy "Electronic errorcompensation of a voltage transformer", IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 28, pp. 86-88, 1979.

9. D. Slomovitz, "Electronic compensation of Voltage Transformer", IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, Vol. 37, N. 4, pp. 652-654, Dec. 1988.

10. A. Baccigalupi, A. Liccardo "A Low Cost Device for the Compensation of Voltage Transformers" IMTC 2008 - Instrumentation and Measurement Technology Conference Vancouver Island, British Columbia, Canada, May 12-15, 2008.