

Исследование эффективности антирезонансных трансформаторов напряжения типа НАМИ в сетях 6-35 кВ с изолированной нейтралью

Лаптев О.И.

(НГТУ, кафедра ТнЭВН, г. Новосибирск)

Постановка исследований

В сетях средних классов напряжения, эксплуатируемых с изолированной нейтралью, наблюдается достаточно большая аварийность трансформаторов напряжения (ТН) типов НТМИ, ЗНОМ и ЗНОЛ вследствие возникновения опасных феррорезонансных колебаний, приводящих к появлению недопустимых токов в обмотке высшего напряжения ТН. [1-3]. Основной причиной феррорезонансных процессов в этих сетях являются однофазные дуговые замыкания (ОДЗ). Поскольку ТН - маломощные трансформаторы, то и соблюдение резонансных условий, как правило, удовлетворяется при относительно небольших емкостях сети. Это условие чаще выполняется в воздушных распределительных сетях, так как емкости на землю ВЛ существенно меньше, чем емкости кабельных линий того же класса напряжения. Кабельные сети собственных нужд электрических станций, а также насосных и компрессорных станций магистральных нефте и газопроводов имеют существенно меньшую протяженность, чем распределительные сети тех же классов напряжения (6 и 10 кВ). В этих сетях также возникают опасные феррорезонансные колебания при ОДЗ. Опасность повреждения трансформаторов напряжения существенно увеличивается при секционировании, т.е. включении нескольких ТН параллельно. Традиционная мера нарушения условий существования опасных феррорезонансных колебаний в этих сетях – включение в рассечку обмотки ТН, соединенной в открытый треугольник, активного сопротивления величиной 25 Ом (рис.1, а), не всегда позволяет исключить возникновение опасных токов в обмотке ВН ТН. Существенно более радикальными мерами нарушения условий возникновения стационарных феррорезонансных колебаний является изменение конструкции ТН, т.е. создание антирезонансных трансформаторов напряжения типа НАМИ. Принципиальная схема конструкции традиционных ТН и антирезонансных ТН типа НАМИ приведены на рис.1.

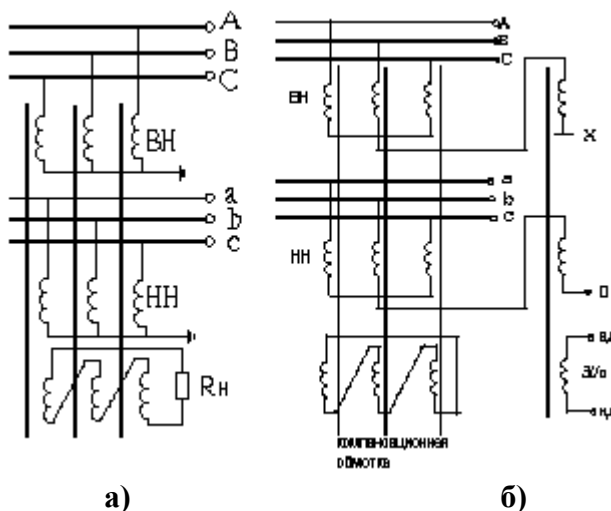


Рис.1. Принципиальная схема соединения обмоток ТН типов НТМИ (а) и НАМИ (б)

Трансформатор напряжений типа НАМИ имеет замкнутую компенсационную обмотку и дополнительный трансформатор в нейтрали. Дополнительный трансформатор служит для измерения напряжения нулевой последовательности. Он выполнен в классе

точности 3.0, с большим количеством витков; обладает практически линейной вольт-амперной характеристикой и большим индуктивным сопротивлением.

Одним из основных назначений ТН типов НТМИ является измерение напряжения нулевой последовательности. Для этой цели ТН выполняется с тремя отдельными магнитопроводами в одном корпусе [4]. Измерение напряжения нулевой последовательности производится при помощи дополнительной обмотки, соединённой в разомкнутый треугольник. ТН типа НАМИ также имеет три отдельных магнитопровода на каждую фазу.

Математическая модель

При исследовании феррорезонансных процессов, наиболее существенной характеристикой трансформатора напряжения является кривая намагничивания магнитопровода. При исследовании использовались кривые намагничивания трансформаторов напряжения, определённые экспериментально в [5]. Эти кривые намагничивания приведены на рис.2.

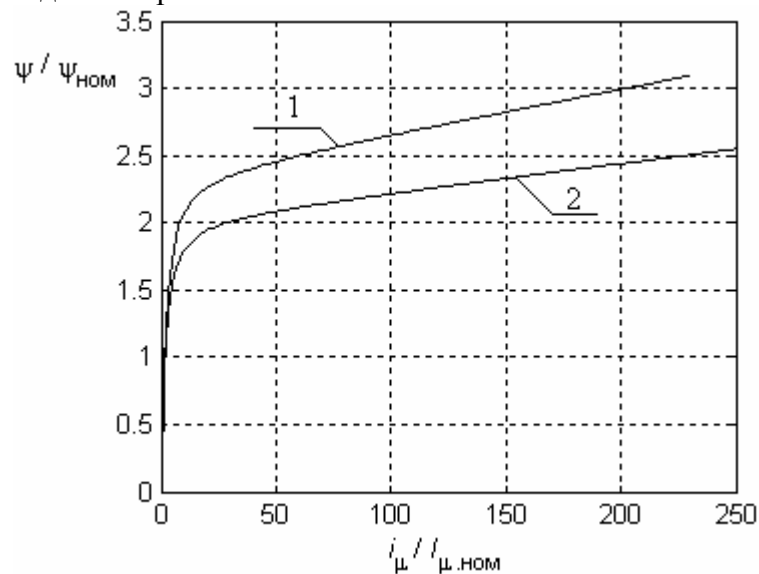


Рис.2. Экспериментальные кривые намагничивания ТН типа НТМИ-10 (1) и НТМИ-6 (2)

Электрическая схема замещения приведена на рис.3. Схема составлена для ТН типа НАМИ (у трансформаторов типа НТМИ, ЗНОМ компенсационная обмотка разомкнута или замкнута на сопротивление 25 Ом).

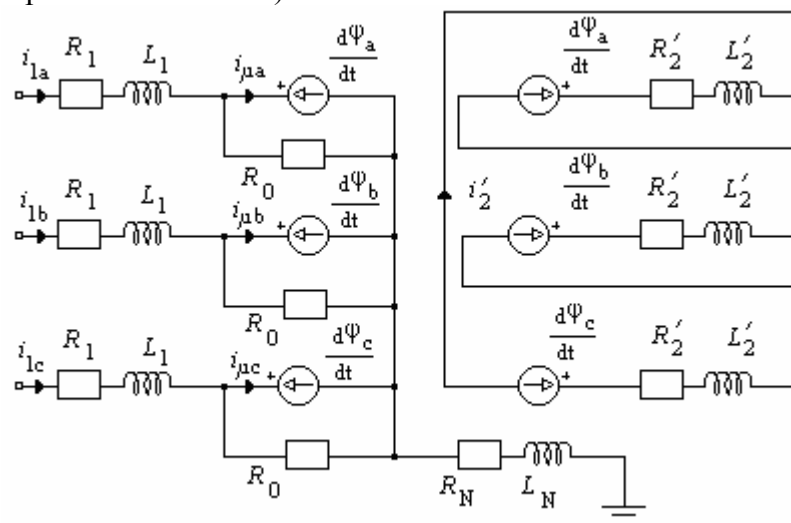


Рис.3. Электрическая схема замещения ТН.

Уравнения (1)-(5) описывают процессы в приведенной на рис.3 электрической схеме замещения ТН:

$$u_\Gamma - i_{1\Gamma} \cdot R_1 - L_1 \cdot \frac{di_{1\Gamma}}{dt} - \frac{d\psi_\Gamma}{dt} - u_N = 0, \Gamma = a, b, c, \quad (1)$$

$$3R_2' i_2' + 3L_2' \frac{di_2'}{dt} + \sum \frac{d\psi_\Gamma}{dt} = 0, \Gamma = a, b, c, \quad (2)$$

$$\frac{d\psi_\Gamma}{dt} = R_0 (i_{1\Gamma} - i_{\mu\Gamma}), \quad \Gamma = a, b, c, \quad (3)$$

$$i_{\mu\Gamma} + i_2' = f(\psi_\Gamma), \quad \Gamma = a, b, c \quad (4)$$

$$u_N = R_N i_N + L_N \frac{di_N}{dt}, \quad i_N = \sum i_{1\Gamma}, \quad \Gamma = a, b, c. \quad (5)$$

В этих уравнениях: n_1, n_2 - числа витков обмоток ВН и НН соответственно. У ТН типа НТМИ нейтраль обмоток ВН заземляется и $u_N = 0$.

Схема замещения сети 6-35 кВ, используемая для исследования процессов в ТН при однофазных дуговых замыканиях на землю, приведена на рис.4. При составлении схемы замещения не учитывалась нагрузка в сети, а также индуктивное и активное сопротивление кабельных линий.

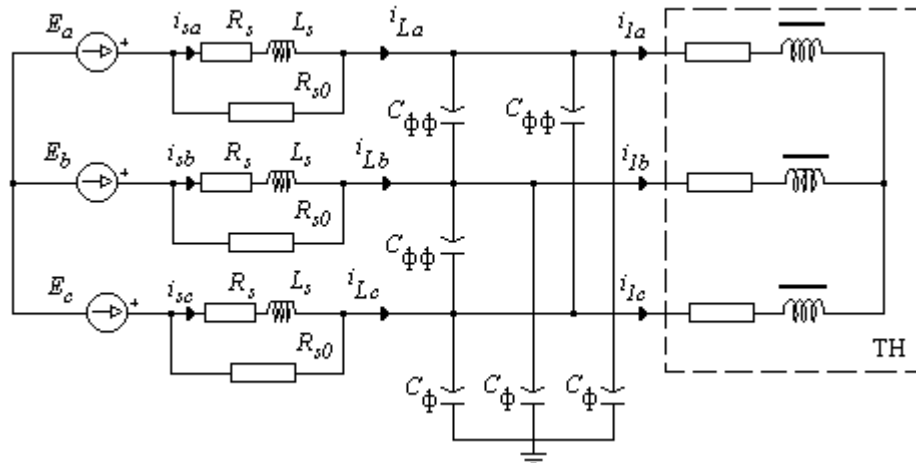


Рис.4. Схема замещения сети с изолированной нейтралью для исследования процессов в ТН при ОДЗ.

Процессы в схеме рис.4 (за исключением процессов в ТН) описываются в виде:

$$\begin{cases} u_{N1} = \frac{\sum u_\gamma}{3}, \\ e_\gamma + u_{N1} - i_{s\gamma} \cdot R_s - L_s \cdot \frac{di_{s\gamma}}{dt} - u_\gamma = 0, \\ i_{L\gamma} = i_{s\gamma} + \frac{e + u_{N1} - u_\gamma}{R_{s0}}, \\ \mathbf{C} \cdot \frac{d\mathbf{U}}{dt} = \mathbf{I}_L - n_T \cdot \mathbf{I}_1 - \begin{vmatrix} u_a / R_\pi & 0 & 0 \end{vmatrix}. \end{cases} \quad \gamma = a, b, c \quad (6)$$

В уравнениях (6)

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} C_{\phi} + 2 \cdot C_{\phi\phi} & -C_{\phi\phi} & -C_{\phi\phi} \\ -C_{\phi\phi} & C_{\phi} + 2 \cdot C_{\phi\phi} & -C_{\phi\phi} \\ -C_{\phi\phi} & -C_{\phi\phi} & C_{\phi} + 2 \cdot C_{\phi\phi} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

-матрица собственных и взаимных суммарных ёмкостей фаз сети (7); $\mathbf{U}, \mathbf{I}_L, \mathbf{I}_1$ - векторы напряжений на фазах, токов в фазах источника и токов в фазах трансформатора соответственно; R_s, L_s, R_{s0} - активное сопротивление, моделирующее потери в меди источника (силовой трансформатор), индуктивность источника и активное сопротивление, моделирующее потери в стали источника; R_d - сопротивление в месте дугового замыкания; n_T - число трансформаторов напряжения.

Моделирование зажигания и погасания дуги производится в соответствии с гипотезой Петерсена, согласно которой зажигание дуги происходит в момент максимума напряжения на повреждённой фазе, а погасание – при первом переходе тока в дуге через ноль [1]. Переходный процесс при повторном зажигании дуги характеризуется двумя составляющими: высокочастотной составляющей, связанной с разрядом ёмкости замкнутой на землю фазы, и составляющей средней частоты, обусловленной перезарядкой ёмкостей «здоровых» фаз через сопротивление источника (силового трансформатора). Последняя частота и момент погасания дуги определяются по выражениям (8).

$$f_0 = \frac{1}{\sqrt{3 \cdot L \cdot (C_{\phi} + C_{\phi\phi})}}, \quad (8)$$

$$t_{\text{пог.д}} = t_{\text{заж.д}} + \frac{1}{2 \cdot f_0}.$$

Исследование феррорезонанса при ОДЗ

На рис.5 приведены компьютерные осциллограммы токов в ТН (рис.5,а) и напряжений на фазах сети (рис.5,б) при одном зажигании и погасании дуги. Расчёт был выполнен для сети 10 кВ с суммарной ёмкостью 2.0 мкФ при двух параллельно включённых ТН типа НТМИ-10. Из рис.5 видно, что в этом расчётном случае возникает устойчивый режим феррорезонанса с большими кратностями токов в обмотках ТН.

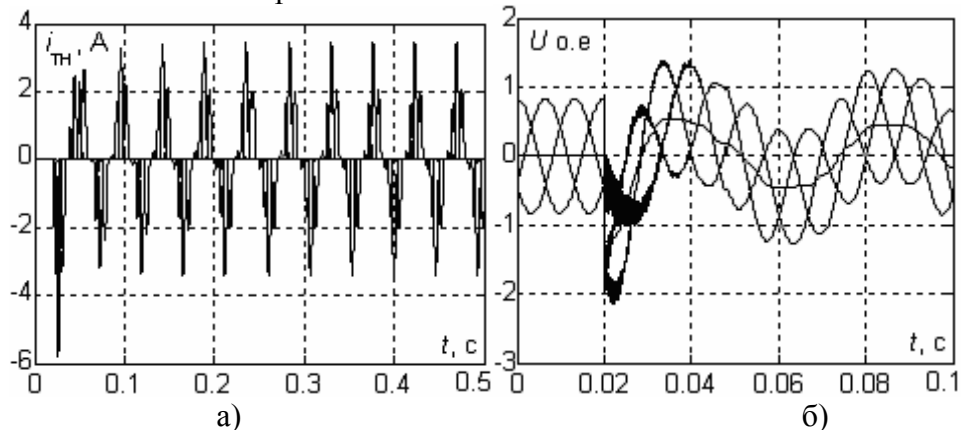


Рис.5. Компьютерные осциллограммы токов в фазах ТН и напряжений на фазах сети при одном зажигании дуги.

ТН типа НАМИ обладает антирезонансными свойствами вследствие того, что замкнутая компенсационная обмотка шунтирует нелинейную индуктивность намагничивания нулевой последовательности, образуемую из-за того, что фазы ТН магнитно не связаны между собой. Именно нелинейная индуктивность нулевой последовательности образует резонансный контур с ёмкостью сети. Эквивалентная схема нулевой последовательности сети и ТН приведена на рис.6. Эту схему легко получить на

основании объединения уравнений (1) с уравнениями (2) и (5) и приведением активного сопротивления и индуктивности компенсационной обмотки к числу витков первичной обмотки.

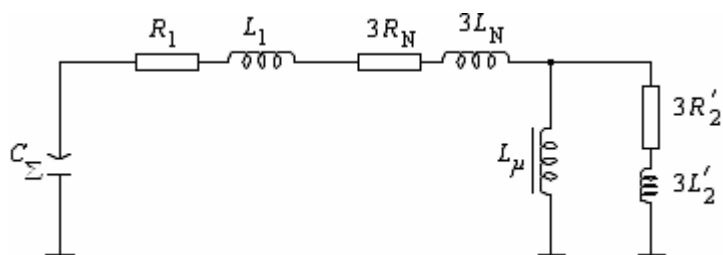


Рис.6. Эквивалентная схема сети с изолированной нейтралью и ТН типа НАМИ. для нулевой последовательности фаз

Из рис.6 видно, что нелинейная индуктивность шунтируется замкнутой накоротко компенсационной обмоткой, которая обладает малым активным сопротивлением и индуктивностью. При появлении на ёмкости напряжения нулевой последовательности (при ОДЗ) ёмкость разряжается через компенсационную обмотку. При этом в фазах ТН возникает характерный затухающий колебательный процесс, компьютерные осциллограммы напряжений и токов в этом процессе приведены на рис.7,а и 7,б. Токи в фазах ТН практически одинаковые, так как на токи намагничивания ТН накладывается значительный ток нулевой последовательности. Увеличение числа ТН типа НАМИ приведёт к увеличению мощности шунта намагничивания нулевой последовательности, но также уменьшится и эквивалентное сопротивление компенсационной обмотки. Таким образом, возникновение феррорезонанса в ТН типа НАМИ полностью исключается даже при параллельной работе нескольких ТН.

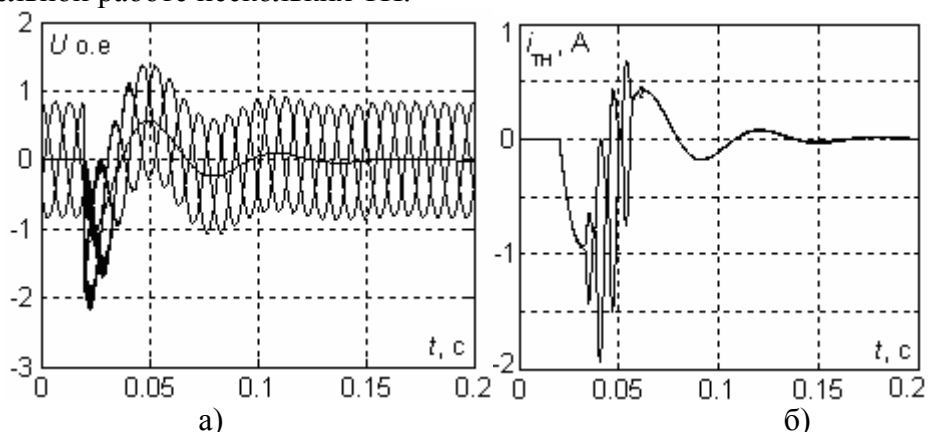


Рис.7. Компьютерные осциллограммы напряжений на фазах и на нейтрали сети (а) и токов в фазах ТН типа НАМИ (б) при одном зажигании дуги.

Дополнительный трансформатор в нейтрали ТН типа НАМИ предназначен для измерения напряжения нулевой последовательности, что является одним из основных назначений ТН данного типа. С помощью этого трансформатора ограничивается ток, протекающий в компенсационной обмотке, за счёт его большого индуктивного сопротивления.

Аналогичные антирезонансные свойства имеет трансформатор с трёхстержневым магнитопроводом (например, ТН типа НАМИ-18 или НТМК), у которого нелинейная индуктивность намагничивания нулевой последовательности практически отсутствует, так как магнитный поток нулевой последовательности замыкается через бак и встречает большое магнитное сопротивление изоляционных промежутков между магнитопроводом и баком. Однако трансформаторы с таким магнитопроводом не могут использоваться для измерения напряжения нулевой последовательности, в отличие от ТН типа НАМИ.

Заключение

Применение трансформаторов напряжения типа НАМИ в сетях с изолированной нейтралью 6-35 кВ позволяет полностью исключить возможность возникновения феррорезонанса при однофазных дуговых замыканиях. Трансформатор напряжения также позволяет измерять напряжение нулевой последовательности, что является одной из основных функций ТН данного типа.

Список использованных источников

- [1]. **Шаргородский В.А.** Автоколебательный процесс – причина повреждения трансформаторов напряжения//Электрические станции,1963,№5.
- [2]. **Лихачев Ф.А.** Схемы подключения дополнительного сопротивления к ТНКИ//Электрические станции,1978,№12.
- [3]. **Зихерман М.Х.** Повреждение трансформаторов напряжения при дуговых замыканиях на землю// Электрические станции, 1978, №11.
- [4]. **Дымков А.М., Тишенин Ю.В.** Трансформаторы напряжения. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1975.
- [5]. **Заболотников А.П., Кадомская К.П., Тихонов А.А.** Математическое моделирование и перенапряжения в электрических сетях 6...35 кВ: Монография / Новосиб. гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 1993. – 158с.