ОСОБЕННОСТИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ОБМОТКАХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ 6–35 КВ

АВТОРЫ:

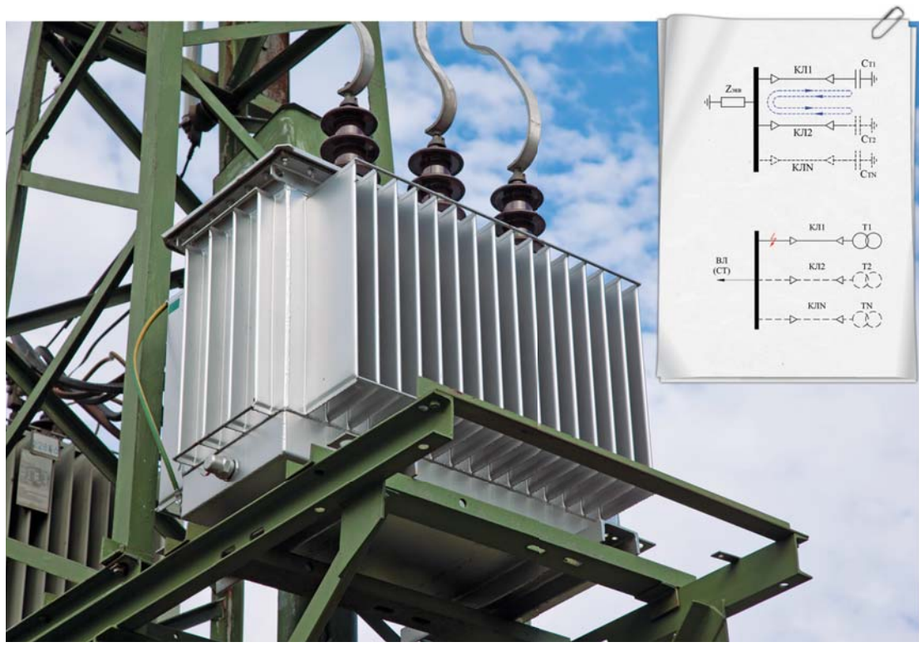
В.С. ЛАРИН,
К.Т.Н.,
ВЭИ — ФИЛИАЛ
РФЯЦ «ВНИИТФ
ИМ. АКАДЕМИКА
Е.И. ЗАБАБАХИНА»

Д.А. МАТВЕЕВ

Б.К. МАКСИМОВ,
Д.Т.Н.,
НИУ МЭИ

Характеристики применяемых в сетях 6–35 кВ распределительных трансформаторов порождают особенности (по сравнению с сетями 110 кВ и выше) развития высокочастотных резонансных перенапряжений. Причем наиболее значимыми являются работа этих трансформаторов с изолированной нейтралью и соединение обмоток высшего напряжения в треугольник.

Ключевые слова: трансформаторы силовые; обмотки трансформаторов; резонансные частоты обмоток; собственные частоты колебаний; коммутационные перенапряжения; резонансные перенапряжения.



Репринт статьи из журнала «Энергетик», 2019 г. № 4

ВВЕДЕНИЕ

В кабельных распределительных сетях 10–35 кВ отмечаются случаи повреждений силовых трансформаторов в результате коммутационных перенапряжений [1–4]. Такие повреждения, как правило, сопровождаются пробоем продольной изоляции (витковыми и/или межкатушечными замыканиями), перекрытиями изоляции отводов и выводов регулировочной части обмотки высшего напряжения (ВН), перекрытиями изоляции устройств регулирования под напряжением (РПН).

Повреждения трансформаторов происходят, несмотря на то что в непосредственной близости от них, согласно действующим нормативным документам (в частности, ПУЭ [5], РД 153-34.3-35.125-99 [6] и др.), установлены защитные аппараты — ограничители перенапряжений нелинейные (ОПН). Поскольку наблюдается повреждение внутренней изоляции трансформаторов, в качестве одной из наиболее вероятных причин можно отметить высокочастотные резонансные (ВЧР) перенапряжения, которые развиваются в обмотках ВН трансформаторов при переходных колебаниях напряжения в сети в точке подключения трансформаторов.

Необходимым условием развития резонансных перенапряжений в обмотках трансформаторов является наличие колебаний напряжения на их зажимах на частотах, близких к собственным частотам колебаний обмоток [7, 8]. При этом для развития опасных резонансных перенапряжений совсем не обязательно, чтобы частота колебаний напряжения в сети точно совпала с собственной частотой колебаний обмотки.

Существует несколько характерных схем и коммутаций, которые приводят к развитию ВЧР-перенапряжений [9, 10]. Наибольшую опасность из них представляют:

1. короткое замыкание на землю одной из фаз на линии, питающей трансформатор;
2. включение под напряжение системы «питающая линия — трансформатор».

Развитие ВЧР-перенапряжений на примере сетей и трансформаторов 110 кВ и выше достаточно подробно описано в литературе [см., напр. 7–11]. Рассмотрим особенности резонансных процессов в обмотках трансформаторов классов напряжения 6–35 кВ.

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ 6–35 КВ НА РЕЗОНАНСНЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ОБМОТКАХ

Выделим ключевые отличия резонансных процессов в обмотках трансформаторов 6–35 кВ по сравнению с обмотками трансформаторов 110 кВ и выше:

1. Трансформаторы напряжением 6–35 кВ — в основном это распределительные трансформаторы, имеющие мощность от нескольких десятков кВА до единиц МВА, что определяет небольшие размеры активной части трансформаторов, небольшую электрическую длину обмотки высшего напряжения (ВН) и сравнительно высокие собственные частоты колебаний обмотки ВН (десятки — сотни кГц).
Поэтому развитие резонансных перенапряжений в обмотках высшего напряжения (ВН) оказывается возможным при меньших длинах питающих кабельных линий. При малых длинах кабелей входное сопротивление (входная емкость) трансформаторов оказывает сильное влияние на основную частоту колебаний напряжения в системе «кабель — трансформатор», что проявляется в ее значительном снижении, особенно в случае соединения обмотки ВН в треугольник [10, 11].
2. В масляных трансформаторах обмотки ВН классов напряжения 6–35 кВ обычно выполняют многослойными цилиндрическими. В обмотках ВН классов напряжения 110 кВ и выше такой тип обмоток практически не применяется. По склонности к развитию резонансных перенапряжений данный тип обмоток занимает промежуточное положение между непрерывными катушечными обмотками (наиболее резонирующие) и полностью переплетенными обмотками (менее резонирующие).
3. Трансформаторы напряжением 6–35 кВ характеризуются сравнительно небольшими испытательными напряжениями и могут быть изготовлены в сухом исполнении. В сухих трансформаторах с воздушно-барьерной главной изоляцией, как правило, применяются непрерывные катушечные обмотки (трансформаторы с открытыми обмотками) и дисковые обмотки (трансформаторы с литыми обмотками). Их конструктивные отличия проявляются следующим образом. Во-первых, катушечные и дисковые обмотки по сравнению со слоевыми обладают меньшей продольной емкостью, что определяет более неодно-

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМАТОРА

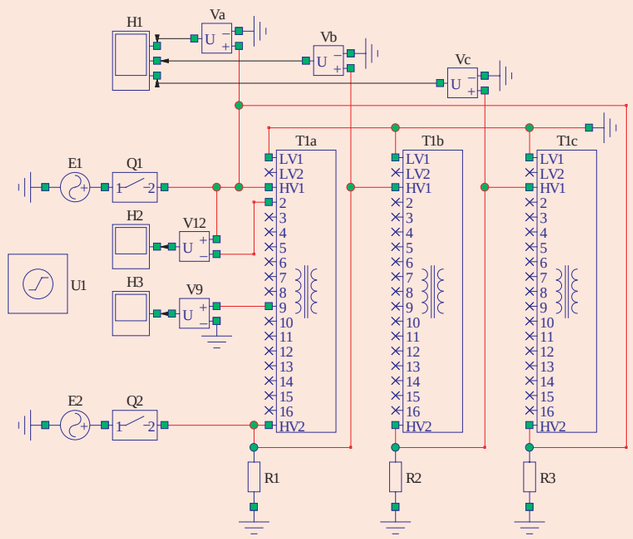


Рис. 1

родное распределение напряжения на высоких частотах и большую амплитуду колебаний в обмотках при резонансных повышениях напряжения. Во-вторых, сухие трансформаторы, как правило, имеют меньшие запасы электрической прочности по сравнению с масляными, особенно для классов напряжения 20 и 35 кВ. В-третьих, твердая изоляция (в противоположность бумажно-масляной и маслобарьерной) не обладает способностью к самовосстановлению, поэтому начальные частичные разряды, образовавшиеся в микроскопических дефектах, способствуют постепенному их росту, увеличению интенсивности разрядов и последующему пробою; это определяет возможность кумулятивного эффекта при воздействии многократно повторяющихся резонансных перенапряжений в обмотках. Следствием этих факторов является большая подверженность сухих трансформаторов напряжением 6–35 кВ повреждениям при воздействии ВЧР-перенапряжений.

4. В сетях 220 кВ и выше нейтраль обмотки ВН трансформаторов, как правило, заземлена, в то время как в сетях 6–35 кВ нейтраль обмотки ВН трансформаторов у потребителей, как правило, не заземляют. Наибольшее применение получили трансформаторы напряжением 6–35 кВ с обмоткой ВН, соединенной в треугольник (например, в трансформаторах со схемой и группой соединения D/Yн-11), что вызвано необходимостью выравнивания несимметричной нагрузки по фазам трансформаторов. Также применяются обмотки ВН с невыведенной нейтралью (например, в трансформаторах со схемой и группой соединения Y/Yн-0 или Y/Zн-11). Отсутствие заземления нейтрали трансформаторов у потребителя приводит к тому, что высокочастотные процессы, протекающие в одной фазе сети, воздействуют более чем на одну фазу питаемой обмотки ВН. При этом выводы каждой из фазных обмоток подключены к разным фазам сети, что определяет возможность наложения переходных процессов в обмотках.

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ВЧР-ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ОБМОТКАХ, СОЕДИНЕННЫХ В ТРЕУГОЛЬНИК

Для качественного анализа процессов в обмотке ВН трансформатора при одновременном возбуждении колебаний по двум фазам сети рассмотрим пример распределительного трансформатора напряжением 20 кВ мощностью 1600 кВА со схемой и группой соединения обмоток D/Yн-11. В целях возбуждения колебаний в фазе А обмотки ВН трансформатора к ее линейным выводам А и В подключены два независимых источника (*E1* и *E2*) незатухающего переменного напряжения. Нейтраль обмотки низшего напряжения (НН) при этом заземлена. Расчеты переходных процессов выполнены в программе EMTLab [11], особенностью которой является возможность проведения расчетов схем с детальными высокочастотными моделями замещения трансформаторов (так называемых моделей белого ящика [7]). Параметры схемы замещения трансформатора рассчитаны в программе Transformer

Transients (TT) [12]. Высокочастотная модель трансформатора задана блоками «детализированный трансформатор» (рис. 1), в которых имеются выводы внутренних точек обмоток, соответствующих переходам между катушками. Наличие доступных промежуточных выводов позволяет определять напряжение на участках главной и продольной изоляции обмоток.

Частота напряжения источников *E1* и *E2* задана равной 26 кГц, что соответствует первой собственной частоте колебаний обмотки ВН, определенной по передаточным функциям напряжения в середине обмотки и напряжения на входных катушках обмотки ВН (рис. 2). Источники *E1* и *E2* подключены к трансформатору не напрямую, а через идеальные ключи, что обеспечивает возможность задания запаздывания включения одного источника относительно другого.

Для наглядности источники *E1* и *E2* коммутируются с запаздыванием около 1 мс относительно друг друга, что в рассматриваемом примере близко ко времени выхода резонансных перенапряжений в обмотке ВН на установившийся уровень. На рис. 3 показаны полученные расчетным путем осциллограммы напряжений в обмотке ВН для двух случаев, а именно, противофазных и синфазных источников *E1* и *E2*.

Рассмотрим резонансные процессы при включении кабельного присоединения с распределительным трансформатором на примере типовой схемы (рис. 4), содержащей кабельные присоединения с трансформаторами 20/0,4 кВ. Нейтраль сети заземлена через резистор *R*, включенный через заземляющий фильтр нулевой последовательности (ФЗО) [нейтраллер]. В общем случае число присоединений может варьироваться. Ключевым для рассматриваемых процессов является подключение к сборным шинам большого количества кабельных присоединений или подключение еще одного кабельного присоединения той же длины. Далее подробно рассмотрен второй вариант — подключение к сборным шинам двух кабельных присоединений той же длины.

В [10, 11] приведено трансцендентное уравнение, с помощью которого можно оценить длину *L*, м, кабельной линии, при которой возникает резонанс:

$$f = \frac{v}{4l}\left[1 - \frac{2}{\pi}\operatorname{arctg}\left(2\pi f C_{вх} Z_C\right)\right], \qquad (1)$$

где *f* — частота колебаний напряжения в системе «питающий кабель — трансформатор», Гц; *v* — скорость распространения волны по кабелю, м/с; $C_{вх}$ — входная емкость трансформатора, Ф; Z_c — волновое сопротивление кабеля, Ом.

В рассматриваемом примере при *v* = 150 м/мкс, Z_c = 20 Ом и $C_{вх}$ = 120 пФ резонансная длина кабеля составила 1440 м.

На рис. 5 приведены полученные расчетным путем осциллограммы напряжений в середине обмотки ВН и напряжений на первой катушке обмотки ВН (фазы А) для случая, когда коммутация первого полюса выключателя (фаза А) происходит в максимум фазного напряжения, при этом второй и третий полюсы выключателя (фазы В и С соответственно) остаются разомкнутыми на протяжении длительного времени. Данный случай характеризует

ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕРЕДИНЕ ОБМОТКИ ВН (А) И НАПРЯЖЕНИЯ НА ПЕРВОЙ КАТУШКЕ (Б) ОБМОТКИ ВН

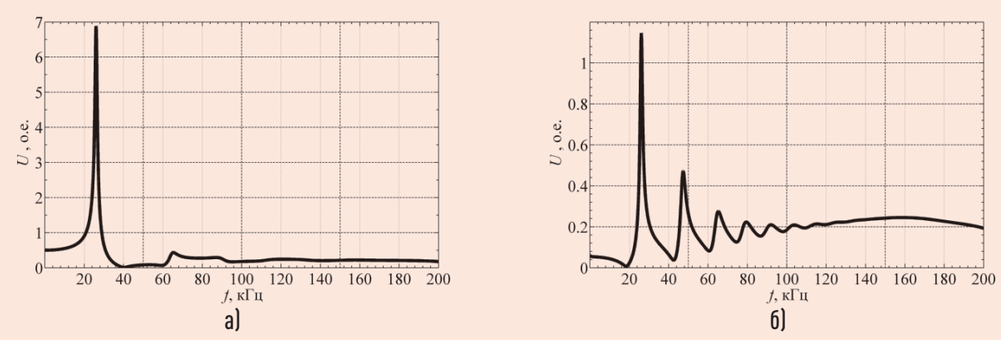


Рис. 2

резонансные процессы, происходящие в отдельно взятой фазе А, без влияния колебаний напряжения в сети на фазах В и С.

Из рис. 5 видно, что ввиду затуханий резонансное повышение напряжения в середине обмотки ВН имеет меньшую кратность (4,21) по сравнению с наибольшей (6,90), определенной по передаточной функции (рис. 3,а).

Современные вакуумные выключатели характеризуются запаздыванием включения полюсов вплоть до 1 мс, что связано с работой привода и процессами предпробоя межконтактного промежутка вакуумных дугогасительных камер. Разное время включения полюсов может привести к несинхронности колебаний напряжения в каждой из трех фаз и описанному выше эффекту с ослаблением или усилением резонансных процессов в обмотке ВН трансформатора.

Далее представлены результаты моделирования резонансных процессов в фазе А обмотки ВН трансформатора, которая в схеме D/Yн-11 подключается к фазам А и В питающей кабельной линии. Рассмотрены два случая включения первого полюса выключателя:

1. в максимум напряжения фазы А; фазные напряжения на фазах А и В в момент включения составляют 100 и 50 %;
2. в максимум линейного напряжения между фазами А и В; фазные напряжения на фазах А и В в момент включения составляют 86,6 и –86,6 %.

Коммутация второго полюса выполнялась с задержкой Δt_{12} (по отношению к первому полюсу), значение которой варьировалось при моделировании. Задержка включения третьего полюса (фазы С) для однозначности была принята равной Δt_{13} = 0,5 мс. На рис. 6 приведены полученные путем математического моделирования зависимости напряжений в середине (V_9) и на первой катушке (V_{12}) от задержки Δt_{12}, отнесенной к периоду колебаний напряжения T_k системы «кабель — трансформатор» (около 26 кГц). Для наглядности напряжения V_9 и V_{12} выражены в относительных единицах путем отнесения к соответствующим значениям напряжений для случая, когда включение первого полюса выполняется в максимум напряжения фазы А, а коммутации вторым и третьим полюсами выключателя не производятся.

НАПРЯЖЕНИЯ В СЕРЕДИНЕ ОБМОТКИ ВН (А, Б) И НАПРЯЖЕНИЯ НА ПЕРВОЙ КАТУШКЕ (В, Г) ОБМОТКИ ВН ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПРОТИВОФАЗНЫХ (А, В) И СИНФАЗНЫХ (Б, Г) ИСТОЧНИКОВ

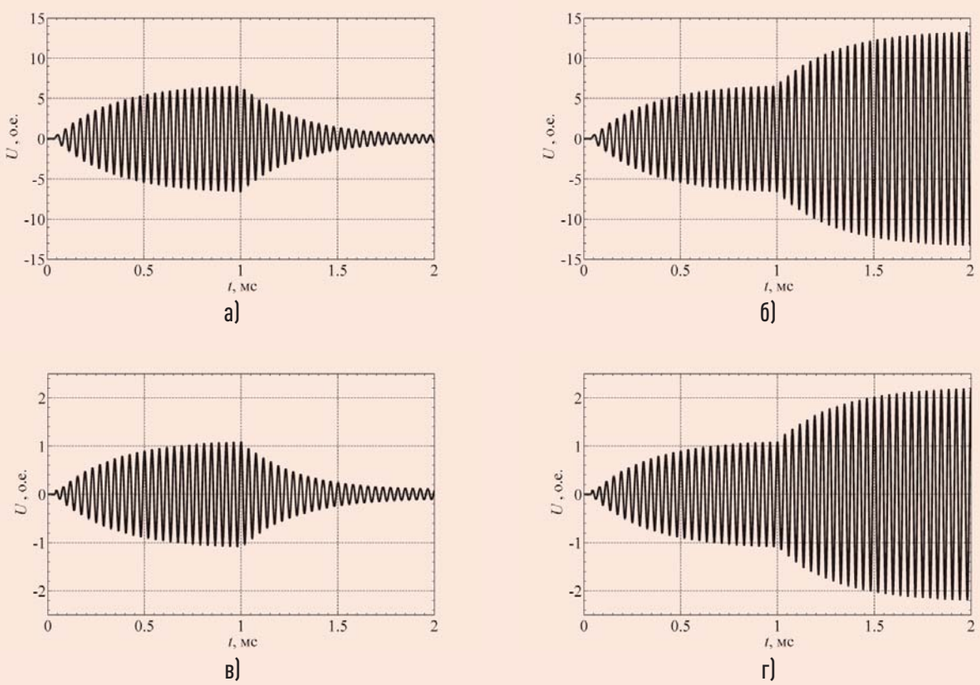


Рис. 3

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По результатам математического моделирования резонансных процессов в соединенной в треугольник обмотке ВН распределительного трансформатора получено, что при одновременном воздействии колебательных напряжений на два линейных вывода обмотки возможно как ослабление, так и усиление в ней резонансных колебаний.

При возбуждении колебаний в обмотке ВН трансформатора двумя источниками незатухающего переменного напряжения получено, что в случае синфазных источников происходит наложение колебаний, сопровождающееся удвоением напряжения на всей обмотке. При включении источников в противофазе происходит затухание колебаний напряжения, вызванное наложением в обмотке двух компенсирующих друг друга колебаний. Как видно из рис. 3, за первую миллисекунду с момента включения первого источника напряжение в обмотке практически достигает своего максимума, в то время как за вторую миллисекунду, после включения второго источника, развивающего в обмотке колебания в противофазе, напряжение снижается практически до нуля. Поскольку колебания в обмотке ВН возбуждались источниками незатухающего напряжения, получены близкие к наибольшим кратности резонансных перенапряжений в обмотке ВН и практически удвоение напряжения.

Очевидно, что при воздействии затухающего высокочастотного напряжения, вызванного, например, коротким замыканием в сети или подключением системы «кабель — трансформатор» к сборным шинам, резонансные перенапряжения в обмотке и усиление колебаний должны быть меньше.

По результатам моделирования для фрагмента сети 20 кВ переходных процессов при включении кабельного присоединения получено, что наложение колебаний напряжения разных фаз, вызванных включением системы «кабель — трансформатор» под напряжение, с учетом затухания может приводить к увеличению резонансных перенапряжений в обмотке в 1,3–1,5 раза. Это увеличение в определенной степени компенсирует снижение резонансной «раскачки» напряжения, вызванное затуханием колебательного напряжения в сети. При этом степень увеличения или ослабления резонансных колебаний определяется тем, каким было значение напряжения на второй фазе в момент включения (предпробоя) второго полюса выключателя по сравнению со значением напряжения на первой фазе в момент включения первого полюса (предпробоя) выключателя.

ОДНОЛИНЕЙНАЯ СХЕМА АНАЛИЗИРУЕМОЙ СЕТИ 20 КВ

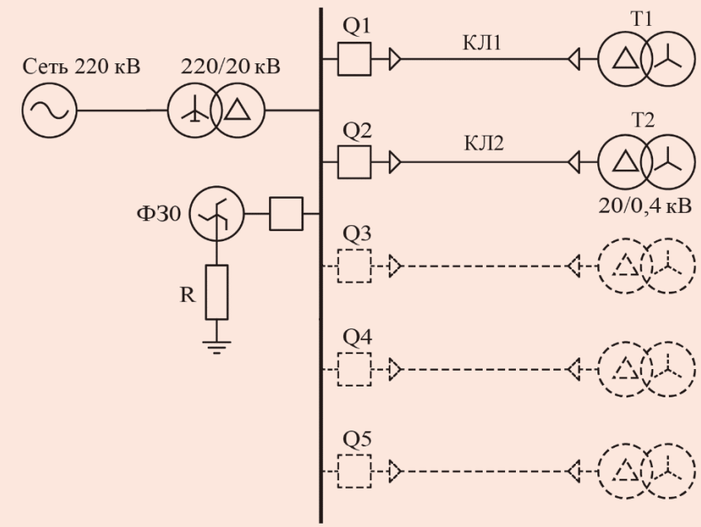


Рис. 4

НАПРЯЖЕНИЯ В СЕРЕДИНЕ ОБМОТКИ ВН (А) И НА ПЕРВОЙ КАТУШКЕ (Б) ОБМОТКИ ВН ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ КАБЕЛЬНОГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ

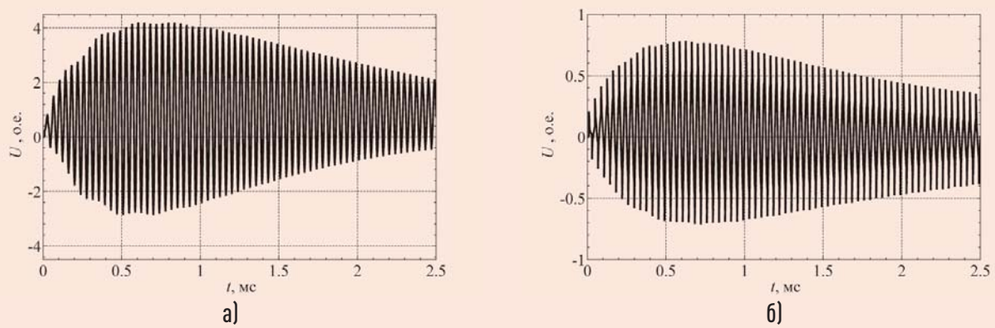


Рис. 5

Данные величины имеют случайный характер и зависят как от характеристик выключателя, так и от параметров сети и протекания в ней переходного процесса при включении первого полюса выключателя. Таким образом, увеличение резонансных перенапряжений в обмотках ВН, соединенных в треугольник, также имеет вероятностный характер.

Следует отметить, что рассмотренное в статье напряжение в середине обмотки ВН характеризует воздействия на главную изоляцию обмоток трансформатора, а напряжение на ее первой катушке — воздействия на продольную изоляцию обмотки ВН. Поскольку неучет отмеченного усиления может приводить к занижению воздействий на изоляцию трансформаторов, при оценке возможных воздействий на изоляцию целесообразно ориентироваться на кратности резонансных перенапряжений с учетом их возможного усиления, ориентируясь на худший случай.

Рассмотренные в статье конструктивные отличия распределительных трансформаторов напряжением 6–35 кВ и эффект усиления колебаний в первичных обмотках трансформаторов необходимо учитывать при разработке мероприятий по защите трансформаторов от резонансных перенапряжений.

Приведенные результаты получены по упрощенным схемам для качественного анализа возможности возникновения ВЧР-перенапряжений. При этом не рассмотрены вопросы влияния нагрузки трансформаторов 20/0,4 кВ и резонанса на высших собственных частотах колебаний трансформаторов, для которых резонансные длины кабелей меньше. Но результаты исследований свидетельствуют о существовании проблемы и необходимости ее решения на стадии проектирования и модернизации сетей. Для строгого решения задачи и разработки нормативных документов, регламентирующих подавление ВЧР-перенапряжений, необходимо моделирование типовых схем на моделях, аналогичных использованным выше, с учетом частотной зависимости параметров схем замещения основного оборудования, в первую очередь кабельных линий и трансформаторов. В настоящее время в данной области достигнуты значительные успехи. Большой вклад внесли результаты рабочей группы СИГРЭ JWG-A2/C4-52 «High-frequency transformer and reactor models for network studies». Использование высокочастотных моделей трансформаторов имеет большое значение для выбора эффективных и экономичных средств защиты от ВЧР-перенапряжений.

ВЫВОДЫ

1. Особенности функционирования сетей 6–35 кВ и характеристики применяемых в них распределительных трансформаторов определяют некоторые отличия в развитии высокочастотных резонансных перенапряжений по сравнению с сетями 110 кВ и выше. Наиболее значимыми являются работа распределительных трансформаторов с изолированной нейтралью и соединение обмоток высшего напряжения в треугольник.
2. При соединении обмоток высшего напряжения трансформаторов в треугольник за счет наложения высокочастотных колебаний разных фаз возможно существенное увеличение резонансных перенапряжений в этих обмотках.
3. Рассмотренные конструктивные отличия распределительных трансформаторов напряжением 6–35 кВ и эффект усиления колебаний в обмотках ВН трансформаторов необходимо учитывать при разработке мероприятий по защите трансформаторов от резонансных перенапряжений.
4. Для разработки нормативных документов, регламентирующих подавление высокочастотных резонансных перенапряжений в обмотках силовых трансформаторов, необходимо моделирование типовых схем на высокочастотных моделях с учетом частотной зависимости параметров схем замещения основного оборудования, в первую очередь кабельных линий и трансформаторов. Использование высокочастотных моделей трансформаторов имеет большое значение для выбора эффективных и экономичных средств защиты от высокочастотных резонансных перенапряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System — Part 2: Case Studies. CIGRE Brochure 577B. Joint Working Group A2/C4.39, April 2014.
2. Transformer Failure Due to Circuit-Breaker-Induced Switching Transients / D.D. Shipp, T.J. Dionise, V. Lorch, B.G. MacFarlane // IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, Vol. 47, Issue 2, pp. 707–718.
3. The Experience Acquired Sizing Snubbers to Mitigate Switching Transients in Industrial Power Systems / C.S. Mardegan, D.D. Shipp, L.A. R. Melo, M.R. Santana // IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, Vol. 52, No. 5, pp. 3644–3654.
4. Исследование причин нарушения электрической прочности изоляции устройства РПН трансформатора с сухой изоляцией / А.С. Брилинский, Г.А. Евдокунин, Т.А. Пономарев // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2018. № 1 (78). С. 130–141.
5. Правила устройства электроустановок: 7-е издание. М.: Энергосервис, 2007. 610 с.
6. РД 153-34.3-35.125-99. Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений. СПб.: Изд-во ПЭИПК, 1999.
7. Electrical Transient Interaction between Transformers and the Power System — Part 1: Expertise. CIGRE Brochure 577A. Joint Working Group A2/C4.39, April 2014.
8. Ларин В.С. Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов. Ч. 1. Условия возникновения и защитные мероприятия // Электричество. 2015. № 11. С. 33–40.
9. Gustavsen B. Study of Transformer Resonant Overvoltages Caused by Cable-Transformer High-Frequency Interaction // IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, No. 2, April 2010, pp. 770–779.
10. Ларин В.С. Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов. Ч. 4. Определение частоты колебаний напряжения в системе «питающий кабель–трансформатор» // Электричество. 2018. № 9. С. 22–28.
11. Approach to analysis of resonance phenomena and overvoltages due to interaction between power transformer and external network / V.S. Larin, D.A. Matveev, A.V. Zhuikov // CIGRE SC A2 & C4 Joint Colloquium, 8–14 September 2013, Zurich, Switzerland.
12. Larin V.S., Matveev D.A. Influence of the Lightning Impulse Shape on the Electrical Stresses on Windings Insulation of Power Transformers and Shunt Reactors // 46th CIGRE Session, report A2-311, Paris, France, 21–26 August 2016.

КРАТНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ В СЕРЕДИНЕ (А) И НА ПЕРВОЙ КАТУШКЕ (Б) ОБМОТКИ ВН ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ В МАКСИМУМ НАПРЯЖЕНИЯ ФАЗЫ А (1) И МАКСИМУМ НАПРЯЖЕНИЯ МЕЖДУ ФАЗАМИ А И В (2)

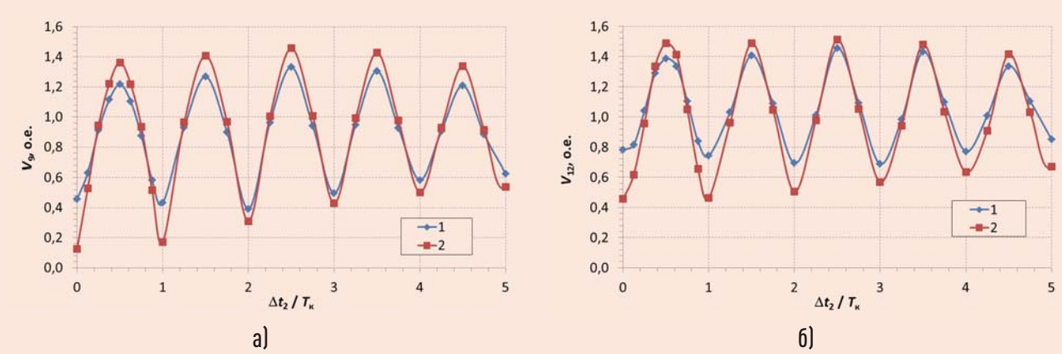


Рис. 6