

ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА С ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ ВТОРИЧНЫМ ТОКОМ ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

А. С. Багинская

(Представлено профессором, доктором технических наук
И. Д. Кутявиным)

Трансформаторы тока с подмагничиванием вторичным током применялись до последнего времени лишь для измерительных целей. В [1] отмечается невозможность использования их в схемах релейной защиты вследствие того, что при сверхтоках значительно увеличивается погрешность таких трансформаторов. Однако исследования, проведенные фирмой АЕG, показали, что наличие дополнительного намагничивания не ухудшает погрешностей при сверхтоках в первичной цепи трансформатора (не уменьшает *Überstromkennziffer*). Так, например, трансформаторы АЕG с дополнительным намагничиванием при 20-кратном токе имеют погрешность в токе порядка 5% и при 30-кратном — порядка 10% [2].

В то же время намагничивание сердечников трансформаторов тока до индукции порядка 6000 гс исключает наличие в них остаточных потоков. Последнее особенно важно в тех случаях, когда трансформаторы тока в схемах защиты работают совместно, как, например, в схемах дифференциальных защит. В таких схемах трансформаторы тока могут приобретать разные по величине и весьма часто по направлению остаточные потоки, которые приводят к значительному увеличению тока небаланса при сквозных коротких замыканиях. Известно, что большинство случаев ложной работы дифференциальных защит происходит по отмеченной выше причине [3].

Противоречивость мнений относительно погрешностей трансформаторов с последовательным подмагничиванием при сверхтоках, а также их положительное свойство саморазмагничивания в рабочем режиме (при определенном выборе параметров) вызвали необходимость исследования вопроса о возможности применения указанных трансформаторов в схемах релейной защиты и, в частности, в схемах дифференциальных защит.

Предлагаемые для схем дифференциальных защит трансформаторы по своей конструкции аналогичны компенсированным трансформаторам тока с противонамагничиванием. В отличие от последних параметры данных трансформаторов тока определяются из условия намагничивания их нормальным рабочим током до индукции в 6000—7000 гс, при которой с остаточными потоками практически можно не считаться.

Анализ работы трансформатора с последовательным подмагничиванием выполнялся на его модели, представленной на рис. 1. По такому же принципу изготовлялись лабораторные трансформаторы тока, которые и подвергались испытаниям. В отличие от действительной конструкции трансформатора его модель имеет обмотки подмагничивания, содержащие $\omega_{n/m}$ витков, на обеих половинах сердечника, а числа витков первичной и вторичной обмоток определяются соотношением:

$$\omega_2 = k_n \omega_1,$$

где k_n — номинальный коэффициент трансформации трансформаторов тока.

Вторичная обмотка включается последовательно с обмотками подмагничивания, которые между собой соединяются последовательно-встречно.

Векторная диаграмма намагничивающих сил, потоков и э. д. с., построенная для модели трансформатора с подмагничиванием в предположении линейности магнитной цепи, малой величины индуктивного сопротивления вторичной обмотки, чисто активной нагрузки и отсутствия потерь в стали, приведена на рис. 2. Суммарные намагничивающие силы половин сердечника θ'_0 и θ''_0 создают в них потоки Φ' и Φ'' . Потоки Φ' и Φ'' наводят э. д. с. E'_2 и E''_2 во вторичной обмотке и $E'_{п/м}$ и $E''_{п/м}$ в обмотках подмагничивания. Суммарной э. д. с. во вторичной цепи E и определяется величина вторичного тока, который при активной нагрузке совпадает с ней по фазе. Пренебрегая нелинейностью магнитной цепи, э. д. с. обмоток подмагничивания сдвинута по отношению к E , а следова-

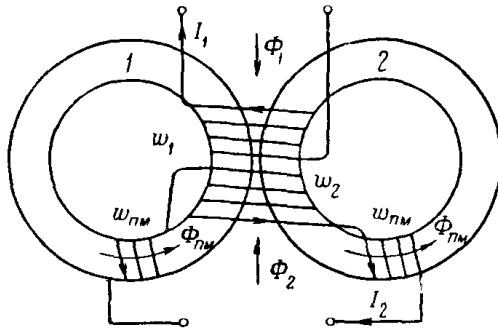


Рис. 1.

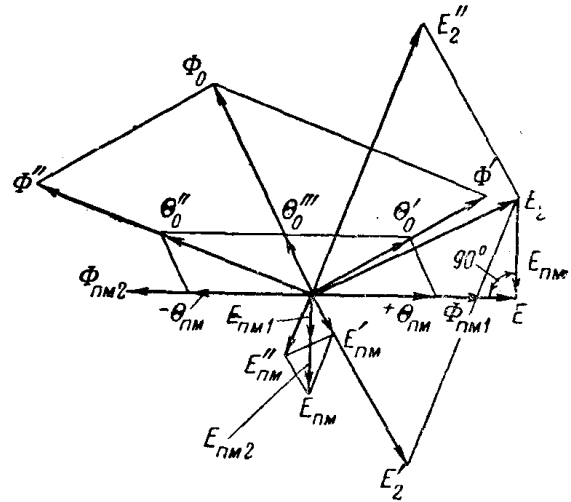


Рис. 2.

тельно, и к I_2 на угол $\frac{\pi}{2}$ и представляет собой э. д. с. самоиндукции обмоток подмагничивания. Такую э. д. с. можно представить в виде обратного вектора падения напряжения от тока I_2 в индуктивном сопротивлении $jx_{п/м}$. В схеме замещения трансформатора сопротивление $jx_{п/м}$ должно включаться последовательно с сопротивлением вторичной обмотки трансформатора и активным сопротивлением обмоток подмагничивания.

Нелинейная зависимость $B=f(H)$, которая наиболее сильно проявляется при сверхтоках в первичной цепи, приводит к уменьшению угла между $E_{п/м}$ и E . В этом общем случае э. д. с. $E_{п/м}$ можно представить в виде обратного вектора падения напряжения от тока I_2 в некотором эквивалентном индуктивно-активном сопротивлении, которое в схеме замещения трансформатора должно включаться последовательно во вторичную цепь. Активное сопротивление r_3 имеет положительное значение при малых индукциях и отрицательное — при работе трансформатора тока за перегибом кривой намагничивания. Индуктивное сопротивление jx_3 всегда положительно. Величина этих сопротивлений непостоянна. Она зависит от степени насыщения сердечника трансформатора, т. е. от величины **первичного** тока.

На рис. 3 приведены зависимости эквивалентных активного и индуктивного сопротивлений лабораторного трансформатора тока с сечением сердечника $q=20 \text{ см}^2$, числом витков первичной и вторичной обмоток $w_1=w_2=100$ витков и числом витков подмагничивающих обмоток $w_{п/м}=10$ витков от величины первичного тока. Они получены

на основании снятых опытным путем векторных диаграмм э. д. с. при включении на вторичную обмотку трансформатора активного сопротивления величиной $0,1 \text{ ом}$. Как следует из приведенных графиков, отрицательное (в рабочем режиме и при сверхтоках) эквивалентное активное сопротивление мало по величине и не может в связи с этим как-либо существенно влиять на трансформацию первичного тока. Положительное индуктивное сопротивление jx_3 значительно превосходит по величине r_3 и сравнимо с сопротивлением вторичной цепи трансформатора при его нормальной работе в схеме дифференциальной защиты. Оно нагружает трансформатор тока и в какой-то мере ухудшает его отдачу. Однако,

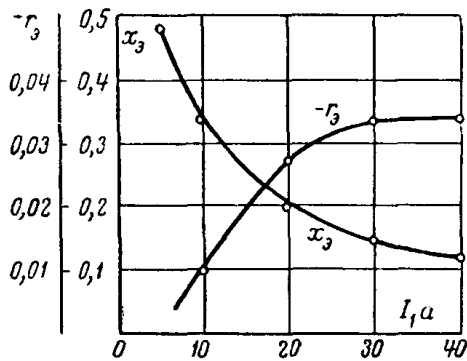


Рис. 3.

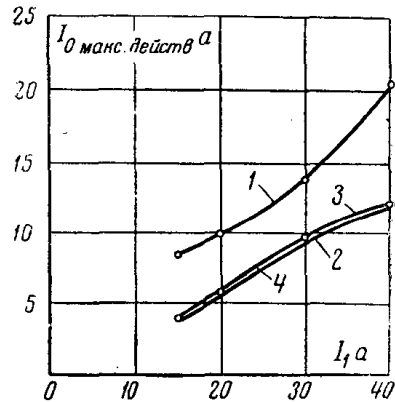


Рис. 4.

как показали опыты, влияние x_3 на точность работы трансформатора весьма незначительно, особенно при включении последовательно реле добавочных сопротивлений.

Установить возможность применения трансформаторов тока с подмагничиванием в схемах дифференциальных защит можно лишь путем тщательного исследования поведения таких трансформаторов в переходных режимах. При этом важно выяснить, как зависит от числа витков подмагничивающих обмоток переходный ток намагничивания и насколько эффективно размагничивание трансформаторов рабочим током.

Для решения поставленных вопросов были сняты зависимости максимального действующего значения тока намагничивания от величины первичного тока при различных значениях чисел витков подмагничивающих обмоток (рис. 4). Переходный процесс в первичной цепи при выполнении опыта сопровождался протеканием тока с максимально возможной аperiodической составляющей. Кривая 1 показывает изменение максимального действующего значения тока намагничивания от первичного тока при числе витков подмагничивающих обмоток $w_{н/м} = 0$ витков и при предварительном намагничивании сердечника трансформатора до остаточной индукции $5-6 \text{ кгс}$. Кривые 2, 3 и 4 изображают соответственно зависимости максимального действующего значения тока намагничивания от первичного при $w_{н/м} = 0$ витков и предварительно размагниченном сердечнике, $w_{н/м} = 10$ витков и $w_{н/м} = 20$ витков.

Как видно из приведенных графиков, максимальный ток намагничивания практически не изменяется при увеличении числа витков подмагничивающих обмоток от 0 до 20. Остаточный магнетизм приводит к значительному возрастанию намагничивающего тока.

Результаты эксперимента говорят о положительном влиянии дополнительного подмагничивания сердечников трансформаторов тока. Действительно, ликвидируя остаточный магнетизм, оно в то же время не приводит к увеличению переходного намагничивающего тока, т. е. трансформатор тока с подмагничиванием ведет себя в переходном режиме так же, как размагниченный трансформатор с большим объемом стали.

Поскольку вероятность наличия в сердечниках трансформаторов тока остаточных потоков весьма велика, совершенно очевидно, что подмагничивание приводит к значительному снижению максимального намагничивающего тока.

Малая зависимость такого тока от числа витков подмагничивающих обмоток объясняется следующим. При переходном процессе в первичной цепи сердечник трансформатора намагничивается до значительной индукции аperiodической составляющей тока намагничивания. Дополнительное подмагничивание частей сердечника в противоположных

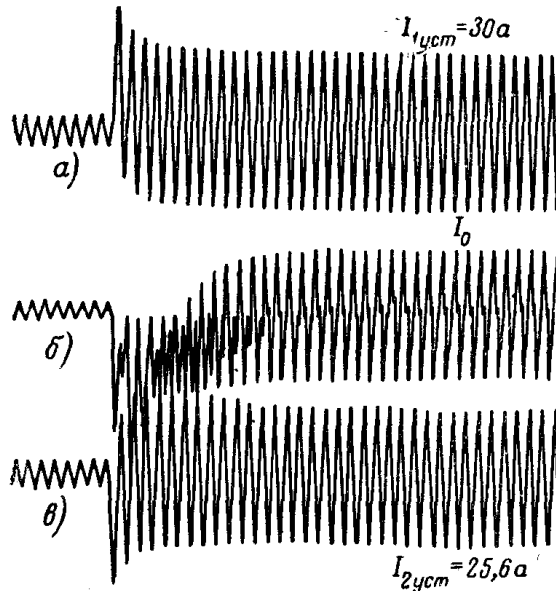


Рис. 5.

направлениях приводит к тому, что в каждый данный момент одна половина сердечника намагничивается и динамическая магнитная проницаемость ее

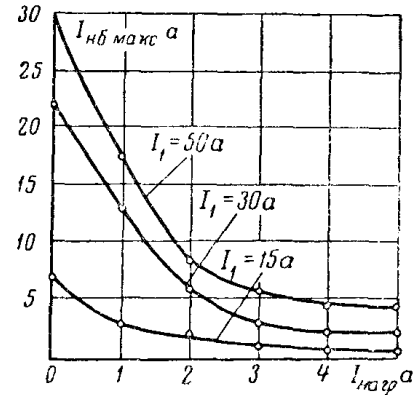


Рис. 6.

уменьшается и тем больше, чем больше витков имеет подмагничивающая обмотка, а другая половина размагничивается и динамическая магнитная проницаемость ее возрастает. В результате эквивалентная магнитная проницаемость мало меняется с изменением подмагничивающих витков, и переходный ток намагничивания практически не зависит от величины последних.

Величина установившегося тока намагничивания по мере увеличения $\omega_{n/m}$ в связи с ростом насыщения обеих половин сердечника возрастает.

Интересно отметить, что в переходном режиме действующее значение переменной составляющей тока намагничивания имеет меньшую величину, чем при установившемся процессе (см. осциллограмму первичного, вторичного тока и тока намагничивания, снятую для лабораторного трансформатора тока с $\omega_{n/m} = 20$ витков и приведенную на рис. 5). Вызвано это тем, что при указанном режиме происходит поочередное размагничивание половин сердечника до области максимальной магнитной проницаемости. Последнее приводит к увеличению эквивалентной магнитной проницаемости, а следовательно, и к уменьшению переменной составляющей намагничивающего тока. Вторичный ток при этом возрастает приблизительно до величины приведенного первичного тока, и погрешность трансформатора резко снижается. В связи с отмеченным свойством трансформаторов тока с последовательным подмагничиванием исключается возможность задержки в срабатывании реле дифференциальной защиты при замыканиях в защищаемой зоне.

Насколько эффективно использование трансформаторов с подмагничиванием вторичным током в схемах дифференциальных защит видно из рис. 6, на котором представлены зависимости максимального значения амплитуды переходного тока небаланса от тока нагрузки при различных величинах тока короткого замыкания. Приведенные графики получены

для дифференциальной защиты шин с одной питающей и двумя отходящими цепями, выполненной на лабораторных трансформаторах тока с сечением сердечника в 10 см^2 . При выполнении опыта пара трансформаторов, участвующих в проведении тока короткого замыкания, намагничивалась до максимальных остаточных индукций противоположного знака, после чего при помощи осциллографа записывался максимальный ток небаланса при протекании по первичной цепи тока с наибольшей возможной апериодической составляющей.

Как видно из рис. 6, ликвидация остаточных потоков нормальным рабочим током способна снизить переходный ток небаланса защиты примерно в 10 раз. Уменьшение рабочего тока до половины нормального приводит к весьма небольшому возрастанию тока небаланса. Экспериментальным путем установлено, что время размагничивания сердечников трансформаторов рабочим током не превышает 1 сек.

Таким образом, подмагничивание трансформаторов вторичным током в значительной степени может повысить чувствительность дифференциальной защиты или, при принятой чувствительности, ее селективность. Такие трансформаторы могут найти применение в схемах дифференциальных защит генераторов, работа которых менее чем с половинной нагрузкой маловероятна, а также в схемах защит других элементов, минимально возможные рабочие токи которых составляют 40% нормального тока нагрузки.

Литература

1. Буткевич Ю. В. и др. Электрическая часть станций и подстанций (под ред. А. А. Глазунова), Госэнергоиздат, 1951.
 2. Городецкий С. С., Измерения на высоком напряжении, Энергоиздат, 1934.
 3. Атабеков Г. И., Релейная защита высоковольтных сетей, Госэнергоиздат, 1949.
-