

И. Ю. Тугай, к. т. н.

АНАЛИЗ ХАОТИЧЕСКОГО ФЕРРОРЕЗОНАНСА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ВЫСОКОГО НАПЯЖЕНИЯ

Проведен анализ и предложена комплексная математическая модель, которая наиболее точно учитывает все начальные условия и адекватно описывает хаотические феррорезонансные процессы в электрических схемах реальной сети.

Ключевые слова: хаотический феррорезонанс, электрическая сеть, перенапряжения, сверхтоки.

Введение

Феррорезонанс – это сложные нелинейные колебания, которые могут возникать в любых схемах электрической сети с нелинейной индуктивностью и емкостью и сопровождаться продолжительными перенапряжениями и сверхтоками, которые не ограничиваются традиционными средствами подавления.

В качестве нелинейных индуктивных элементов в электрических сетях могут выступать, например, электромагнитные трансформаторы напряжения. Емкостными элементами могут быть, например, емкостные делители напряжения в выключателях, а также емкости шин и присоединенного к ним оборудования.

При таких условиях любые переходные процессы, атмосферные перенапряжения, подключение или отключение трансформаторов, возникновение или ликвидация коротких замыканий и другие возмущения могут вызвать появление феррорезонансных процессов. Эти процессы сопровождаются перенапряжениями и сверхтоками, которые обуславливают опасность таких режимов на практике. Особенно это касается феррорезонансов на основной частоте. Однако после внедрения современных цифровых средств регистрации аномальных процессов в электрических сетях возникла вероятность появления нетрадиционных феррорезонансных процессов, таких как хаотический феррорезонанс. Иницируются хаотические феррорезонансные процессы главным образом при коммутационных операциях и могут приводить к некорректной работе устройств релейной защиты и автоматики, а также к появлению в обмотках трансформаторов напряжения опасных сверхтоков, поэтому анализ таких явлений является довольно актуальной задачей.

Основная часть

Электрические сети с номинальным напряжением выше 110 кВ работают с эффективным заземлением нейтрали, а трансформаторы напряжения, которые в них устанавливают, изготавливают однофазными, поэтому для исследования феррорезонанса целесообразно использовать однолинейную схему замещения с моделью однофазного трансформатора напряжения, которую путем элементарных эквивалентных преобразований можно привести к классической схеме последовательной феррорезонансной цепи. Такая феррорезонансная цепь состоит из источника питания E ; суммарной емкости делителей напряжения выключателя, емкостей шин и присоединенного к шинам оборудования C ; сопротивления R , которое учитывает потери в трансформаторе напряжения и нелинейной индуктивности трансформатора напряжения L [1].

В зависимости от особенностей протекания процесса феррорезонанс подразделяют на четыре группы:

1. Периодический феррорезонанс на основной частоте. При таком феррорезонансном процессе напряжения и токи имеют период, равный периоду системы, и могут иметь разное количество гармоник. Спектр сигнала дискретный и состоит из основной частоты системы и

ее высших гармоник.

2. Субгармонический феррорезонанс. Напряжения и токи также являются периодическими с периодом, кратным периоду источника питания. Спектр имеет как основную частоту, так и гармоники.

3. Квазипериодический феррорезонанс. Он не является периодическим. Спектр гармонических составляющих при таком режиме дискретный.

4. Хаотический феррорезонанс. Такой феррорезонанс не является периодическим. Соответствующий спектр гармонических составляющих непрерывный, то есть не пропускают ни одной частоты [2].

Для решения задачи анализа хаотических феррорезонансных процессов по предотвращению их возникновения и развития необходимо иметь средства выявления необходимых и достаточных условий появления феррорезонансных процессов.

По понятным причинам экспериментальные исследования хаотических феррорезонансов на шинах подстанций высокого напряжения ограничены, поэтому для выявления причин возникновения данных явлений и предотвращения их возможных негативных последствий нужно исследовать режимы методами математического моделирования.

Как известно, для феррорезонансных явлений характерным является продолжительный переходной процесс, и поэтому использование традиционных моделей и методов, предназначенных для исследования быстротекущих электромагнитных переходных процессов, часто становится неэффективным. Такие методы не позволяют найти опасные отклонения параметров схемы и режима с угрозой возникновения феррорезонансных процессов, особенно это касается хаотического феррорезонанса, поэтому для поиска достаточных условий возникает необходимость в разработке математических моделей, которые более адекватно описывают хаотические феррорезонансные процессы по сравнению с традиционными моделями.

Как уже было указано ранее, для появления феррорезонансных процессов в электрических сетях необходимо наличие индуктивного элемента с ферромагнитным сердечником. Именно точность математических моделей трансформаторов больше всего влияет на достоверность результатов расчетов феррорезонанса. Наиболее удовлетворительную точность обеспечивает использование полинома 11-го порядка. Однако для разработки более адекватных математических моделей трансформаторов с целью анализа хаотических феррорезонансов необходимо учитывать эффект гистерезиса. Это позволяет сделать модель Джилса – Атертона, которую записывают в виде дифференциального уравнения, а для ее идентификации достаточно одной петли гистерезиса, полученной экспериментально:

$$\frac{dM}{dH} = \frac{1}{(1+c)} \frac{(M_{an} - M)}{k\delta - \alpha(M_{an} - M)} + \frac{c}{1+c} \frac{dM_{an}}{dH}, \quad (1)$$

где M – суммарное намагничивание стального сердечника трансформатора;
 $M_{an} = M_s \left(\operatorname{cth} \left(\frac{H_e}{a} \right) - \frac{a}{H_e} \right)$ – безгистерезисное намагничивание; M_s – намагничивание насыщения; $H_e = H + \alpha M$ – эффективное поле доменов; a – коэффициент формы безгистерезисной кривой, который определяют как величину напряженности, при которой: $M_{an} = \frac{M_s}{2}$; k – коэффициент, который определяет ширину петли гистерезиса; α – коэффициент, постоянная скрепления доменных границ; δ – коэффициент перемагничивания, который принимаем как: $\delta = 1$ при $\frac{dH}{dt} > 0$ и $\delta = -1$ при $\frac{dH}{dt} < 0$.

С помощью математической модели (1) можно смоделировать все черты гистерезиса. Для

описания поведения нелинейной индуктивности необходимо задать пять основных параметров. Алгоритм идентификации заданной петли гистерезиса имеет два итерационных цикла – внутренний и внешний. На внутреннем цикле решают систему алгебраических уравнений. На внешнем цикле методом Рунге – Кутты решают систему дифференциальных уравнений. Степень адекватности модели реальным данным можно считать достаточной и в любом случае значительно большей, чем традиционное использование основной кривой намагничивания. Кроме того, эта модель разработана с ориентацией на применение вычислительной техники, поэтому имеет быстрый и стабильный алгоритм реализации [3].

Для анализа хаотического феррорезонансного процесса была использована исходная схема подстанции «Северная» (рис. 1), предоставленная службами Центральной энергосистемы. Путем эквивалентных преобразований она была приведена к схеме последовательной феррорезонансной цепи. Необходимым индуктивным элементом для образования контура был трансформатор напряжения на III секции шин, а емкостями – емкости делителей выключателей ВВ-330 и ВВ-330-I ЧАЭС и емкости ЛЭП, оборудования и шин подстанции относительно земли.

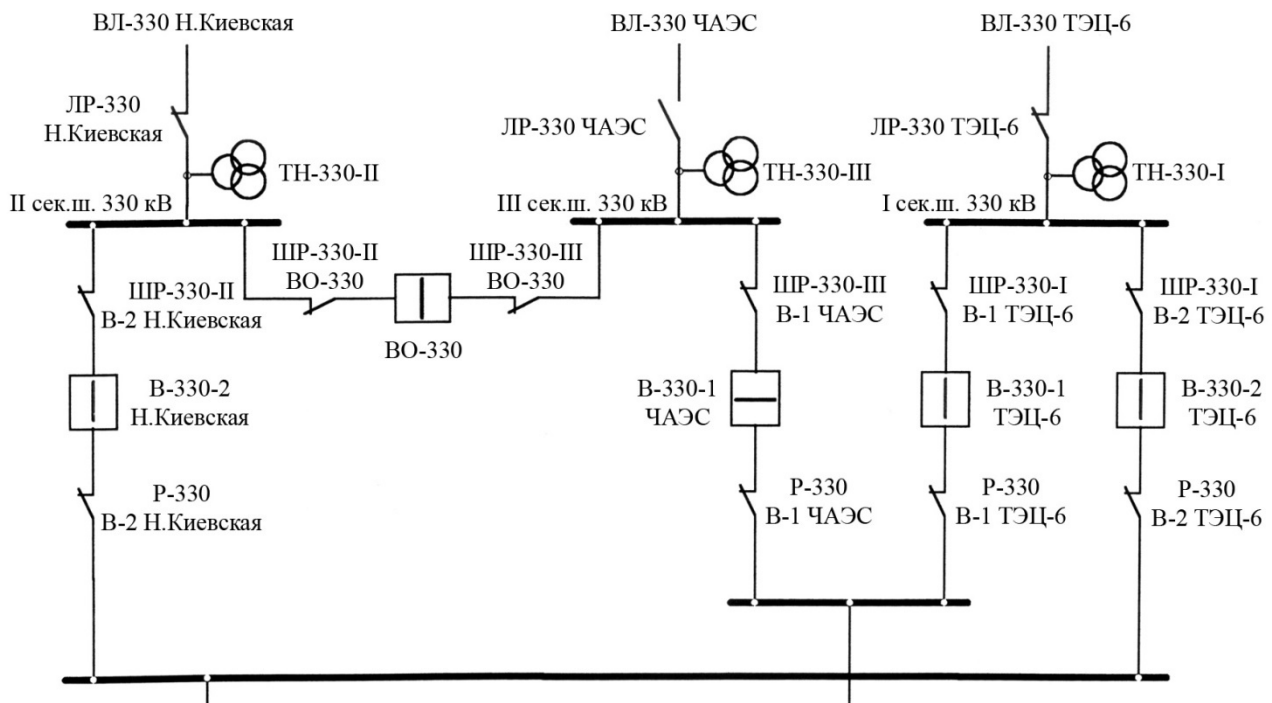


Рис. 1. Схема распределительного устройства подстанции «Северная» 330 кВ Центральной энергосистемы

Как можно увидеть на рис. 1, на фазе А появилось напряжение с амплитудой около 70% рабочего, причем в фазах В и С такого роста напряжения не наблюдалось. Такой режим является недопустимым, поскольку информация о напряжениях, которую получают от первичных датчиков, не достоверна. Кроме того, по обмотке протекает ток, превышающий предельно допустимый, происходит нагревание и тепловое разрушение изоляции, которое приводит к витковым замыканиям и, в результате, к повреждению трансформатора напряжения. Также негативное влияние хаотические феррорезонансы оказывают на устройства релейной защиты и автоматики, которые подключают к вторичным цепям трансформатора напряжения. Это влияние проявляется в недостоверной информации при опробовании шин на наличие напряжения и, как следствие, отказа АПВ шин после ликвидации дугового короткого замыкания. В результате шины остаются отключенными.

Это что касается расчетов для определения достаточных условий возникновения хаотического феррорезонанса. Относительно определения необходимых условий развития хаотического феррорезонансного процесса, то причины трудностей становятся понятными после применения подходов нелинейной динамики. Как известно, уравнение для колебательной системы, мгновенное состояние которой задают две величины, обобщенная координата x и ее производная, и на которую действует внешняя периодическая сила, определяют нелинейным диссипативным осциллятором:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \gamma \frac{dx}{dt} + f(x) = A \cos \omega t, \quad (2)$$

где t – время; ω – угловая частота системы.

Дифференциальное уравнение, которое описывает процесс в феррорезонансной цепи:

$$\frac{d^2\psi}{dt^2} + \frac{G}{C} \frac{d\psi}{dt} + \frac{1}{C} i_L = \omega E \cos(\omega t + \delta), \quad (3)$$

где ψ – потокосцепление обмотки трансформатора напряжения; G – проводимость, которая учитывает потери в магнитопроводе трансформатора напряжения подстанции; C – эквивалентная суммарная емкость делителей напряжения выключателя C_B , емкостей шин и присоединенного к шинам оборудования $C_{ш}$; E – электродвижущая сила.

Если сравнить дифференциальное уравнение состояния феррорезонансной цепи (3) с уравнением теории нелинейной динамики (2), становится очевидным, что оно является нелинейным диссипативным осциллятором. Важным является тот факт, что под действием внешней периодической силы этот осциллятор может иметь три типа движений: периодический (с основной частотой или кратной ей); псевдопериодический (спектр состоит из частот не кратной основной) и хаотический (непрерывный спектр частот). Также важно, что любой из этих типов имеет свой аттрактор – множество, где сходятся все траектории, которые начались в определенной области пространства – бассейне аттрактора. Для нас важным является то, что, несмотря на свою непредсказуемость, в фазовом пространстве диссипативных систем существуют аттракторы даже для хаотичных траекторий. Это так называемые странные аттракторы – сложно устроенные множества, которые имеют более тонкую структуру на разных уровнях их деления и нецелочисленную размерность (фракталы).

Следовательно, хотя нахождение системы в конкретный момент времени в конкретной точке фазового пространства принципиально невозможно предусмотреть, область нахождения объекта и его движение к аттрактору можно предвидеть. Это дает основание утверждать, что существует возможность оценить наличие необходимых условий для хаотического феррорезонансного процесса в реальной электрической сети при любом объединении параметров, поскольку для этого достаточно изучить аттракторы диссипативной системы, поэтому, несмотря на существование хаотичной непредсказуемости феррорезонансного процесса, наличие аттракторов и их бассейнов указывает на возможность определения опасных зон в пространстве изменения параметров.

Метод диаграмм бифуркаций, точек, где система переходит от одного типа режима к другому, может быть использован для нахождения зон опасных значений параметров, которые вызывают хаотический феррорезонанс. Поиск этих точек можно проводить непосредственными расчетами, но их нужно десятки тысяч для каждого из параметров, поэтому целесообразно выполнять направленный перебор возможных вариантов: двигаться от одной точки стабильности к другой, выполняя линейный поиск в окрестностях последней точки – метод продолжения. Для этого был использован пакет программ WINPP, имеющийся

в свободном доступе. Пакет имеет две функциональные части. Первая часть позволяет найти начальную точку для построения диаграммы бифуркаций, то есть нормальный устойчивый режим без перенапряжений. Вторая часть позволяет реализовать метод продолжения по выбранному параметру схемы замещения феррорезонансной цепи. Результаты можно наблюдать в виде последовательного построения диаграммы бифуркации [4].

Чтобы провести исследование наличия необходимых условий возникновения хаотического феррорезонанса в схеме распределительного устройства подстанции с номинальным напряжением 330 кВ (рис. 1), была рассчитана система уравнений, которую использовали в программе WINPP. Для этого было рассмотрено дифференциальное уравнение:

$$\frac{d\psi}{dt} + \frac{1}{C} \int idt + Ri = E' \sin \omega t, \quad (4)$$

где R – потери в обмотках, вызванные нагрузкам вторичной обмотки трансформатора напряжения; E' – эквивалентная электродвижущая сила, определяемая по выражению:

$$E' = E \frac{C_B}{C_B + C_{III}}.$$

Аппроксимацию кривой намагничивания трансформатора напряжения выполнял полином 11-й степени:

$$i_L(\psi) = a\psi + b\psi^{11}, \quad (5)$$

где i_L – ток намагничивания; a , b – коэффициенты аппроксимации кривой намагничивания трансформатора напряжения.

Тогда систему уравнений для программы WINPP можно записать как:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi}{dt} &= \psi_1; \\ \frac{d\psi_1}{dt} + \frac{G + aRC + 10bRC\psi^{10}}{C(1+RG)}\psi_1 + \frac{a}{C(1+RG)}\psi + \frac{b}{C(1+RG)}\psi^{11} &= E'' \cos \omega t, \end{aligned} \quad (6)$$

где E'' – эквивалентная электродвижущая сила, которую рассчитывают по формуле: $E'' = \frac{\omega}{1+RG} E'$.

Расчеты с помощью программы WINPP показали, что хаотический феррорезонанс инициируется в ограниченном диапазоне значений емкостей шин распределительного устройства подстанции «Северная» 330 кВ Центральной энергосистемы, причем при переходе от нормального режима к хаотическому феррорезонансу наблюдается бифуркация. После построения диаграммы бифуркаций для параметра нагрузок было найдено, что бифуркация с появлением хаотического феррорезонанса возможна только до величины сопротивления 500 МОм. Дальше на диаграмме появляются ветви только феррорезонанса на основной частоте.

Выводы

Исследовано возникновение и развитие хаотического феррорезонанса в электрических сетях высокого напряжения с помощью математической модели, которая более адекватно описывает хаотические феррорезонансные процессы по сравнению с традиционными моделями. Анализ был проведен для подстанции «Северная» 330 кВ Центральной энергосистемы. Аналогичные исследования могут быть выполнены для типичных схем распределительных устройств подстанций напряжением 110 – 500 кВ с электромагнитными

трансформаторами напряжения.

Результаты данных исследований могут быть применены при разработке нового нормативного документа Министерства энергетики и угольной промышленности Украины по обнаружению феррорезонансных процессов в электрических сетях высокого напряжения и предотвращению их, а также при разработке нового программного обеспечения для использования в энергосистемах Национальной энергетической компании «Укрэнерго».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тугай І. Ю. Визначення наявності умов виникнення ферорезонансного процесу в електричних мережах високої напруги / І. Ю. Тугай // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2014. – Вип. 39. – С. 9 – 12.
2. Ferracci P. Ferroresonance / P. Ferracci // Cahier technique. Schneider Electric. – Paris, 1998. – No. 190. – P. 1 – 28.
3. Jiles D. C. Theory of ferromagnetic hysteresis: determination of model parameters from experimental hysteresis loops / D. C. Jiles, J. B. Thoelke // IEEE Transactions on Magnetics. – September 5, 1989. – Vol. 25. – P. 3928 – 3930.
4. Кузнецов В. Г. Аналіз ферорезонансних процесів в розподільчому пристрої підстанції високої напруги за допомогою методів нелінійної динаміки / В. Г. Кузнецов, І. Ю. Тугай // Технічна електродинаміка (Темат. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність»). – 2012. – Ч. 3. – С. 33 – 34.

Тугай Ирина Юрьевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела оптимизации систем электроснабжения, tugai@ukr.net.

Институт электродинамики Национальной академии наук Украины.