

АНАЛИЗ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ ПРОЦЕССОВ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

ГАШИМОВ А.М., БАБАЕВА А.Р.

Институт Физики НАН Азербайджана

В данной обзорной статье приводится анализ феррорезонансных схем методами математического моделирования. Показано, что феррорезонансные токи в качестве основного параметра процесса могут быть использованы при определении технических требований прибора для выявления и подавления феррорезонанса.

Развитие энергетики в последние годы привело к существенно более широкому пониманию моделирования сложных электромагнитных процессов, происходящих в энергосистемах.

Математическое моделирование является в настоящее время основным средством анализа режимов работ энергетических систем. Как известно, математическая модель представляется системой дифференциальных уравнений, обычно упрощенных по сравнению с теми, которые входили или должны были бы входить в общую модель. Математическая модель содержит алгоритмы и программы для решения, а также набор начальных и граничных условий. Значительное число работ связано с разработкой математических моделей, как отдельных элементов, так и режимов работы энергетических систем. Методические основы, математические модели и методы исследования и обеспечения надежности электроэнергетических систем постоянно развиваются. В [1-4] приведены результаты анализа принципов построения и особенностей полной и основных упрощенных моделей переходных и установившихся процессов в сложных электроэнергетических системах. Однако, при анализе не в полной мере рассматриваются вопросы моделирования на основе современных информационных технологий. Анализ ряда комплексов программ, которые в различной степени позволяют моделировать установившиеся режимы работы, позволяет сделать вывод, что вопросам создания единой модели объекта моделирования уделяется недостаточно внимания.

Современные электронные вычислительные машины в настоящее время являются эффективным средством для математического моделирования сложных задач энергетики. Они позволяют проводить расчеты при наиболее полном описании объектов. Однако, в этих случаях проведение расчетов становится весьма трудоемким, так как требует от исполнителей большой подготовительной работы.

Реализация математических моделей на ЭВМ осуществляется с помощью методов вычислительной математики, которая непрерывно совершенствуется вместе с прогрессом в области электронно-вычислительной техники [5].

Современной формой метода математического моделирования, базирующейся на мощной вычислительной базе в виде ЭВМ и программного обеспечения (MATLAB, MATCAD и др), реализующего алгоритмы численного решения, является вычислительный эксперимент, рассматриваемый как новый теоретический метод исследования различных явлений и процессов.

Необходимость исследования режимов работы энергетических систем, приводящих к повреждению электрооборудования и недоотпуску электроэнергии, с целью разработки мероприятий по их предотвращению и ликвидации, определяет требования надежного электроснабжения потребителей. Одними из важнейших причин возникновения таких режимов являются феррорезонансные явления.

Анализ феррорезонансных схем методами математического моделирования требует наличия соответствующей методики. Такая методика, использование которой

позволяет получать как качественные, так и количественные характеристики объекта, была предложена в [6-8].

При анализе феррорезонансных схем необходимо рассчитать переходные и установившиеся процессы, протекающие в схеме, и определить токи и напряжения в цепи в функции времени. Так как феррорезонансные схемы относятся к нелинейным электрическим цепям, то, в отличие от линейных, где соблюдается принцип наложения, в данном случае не существует общих приемов аналитического решения нелинейных дифференциальных уравнений [9,10]. В нелинейных цепях всякое изменение формы и амплитуды действующего сигнала приводит к новой задаче с новым решением.

В работе [6] для расчета феррорезонансных схем используется метод, основанный на составлении уравнений цепи с использованием аналитической аппроксимации нелинейных характеристик намагничивания трансформаторов и их решения методами численного интегрирования [10].

Особенность применения методов численного интегрирования заключается в том, что при расчете требуются средства вычислительной техники.

Как известно, при неполнофазной работе нарушается симметрия проводимости фаз. Причиной этого являются обрывы проводов, нарушение контактов заградителей высокочастотной связи, неполнофазные операции выключателями, неодновременное размыкание контактов выключателей и разъединителей и т.д.

Феррорезонансные схемы сетей 110кВ при неполнофазных режимах работы имеют участки воздушных линий электропередачи. На результаты расчетов в значительной степени оказывает влияние математическое описание процессов, протекающих в этих линиях.

Системы нелинейных дифференциальных уравнений состояния феррорезонансных схем рассчитываются с помощью приближенных методов численного интегрирования. Известны различные методы численного интегрирования [11,12], однако их эффективность для расчета определенного класса задач может сильно отличаться. Эффективность конкретного метода зависит от достаточной точности численного решения и требуемого для расчета времени [13]. Эти два фактора тесно взаимосвязаны, так как увеличение точности влечет за собой увеличение времени расчета. Исходя из этого, определяются методы численного интегрирования, имеющие оптимальное сочетание указанных факторов при расчете феррорезонансных схем.

Точность численного решения и расчетное время во многом зависят от выбора шага интегрирования, порядка локальной ошибки и численной устойчивости метода. Под численной устойчивостью метода понимается свойство уменьшения локальной ошибки при переходе к следующему шагу интегрирования [13]. Наиболее оптимальный порядок локальной ошибки для расчета рассматриваемого класса схем имеют методы четвертого порядка. Выбор шага интегрирования и численная устойчивость метода зависят от математического описания уравнений состояния.

Рассматриваемые системы уравнений состояния феррорезонансных схем относятся к «жестким» нелинейным системам, т.к. они имеют производные, изменяющиеся с большой или малой скоростью, отличающейся на несколько порядков. Для численного решения подобных уравнений используются неявные методы численного интегрирования, позволяющие в широком диапазоне изменять шаг интегрирования при переходе к участкам с другой скоростью изменения решения, сохраняя при этом численную устойчивость. Неявные методы численного интегрирования с данной точки зрения, по сравнению с явными, являются более предпочтительными. При использовании неявных методов можно выбирать шаг интегрирования достаточно большим, исходя только из условий получения необходимой точности. В этом случае на каждом шаге решается система нелинейных алгебраических уравнений.

К настоящему времени не существует общих методов решения «жестких» нелинейных систем дифференциальных уравнений [13]. Можно оценить численную

устойчивость метода интегрирования и спрогнозировать его поведение только при расчете систем линейных дифференциальных уравнений. Поэтому, круг выбора ограничивается методами расчета «жестких» систем линейных уравнений и на основании результатов вычислительных экспериментов определяются наиболее оптимальные из них.

Точный анализ феррорезонансных явлений ввиду несинусоидальности формы кривых напряжения и тока представляет значительные трудности.

В работе [14] Алексеева В.Г. и Евдокимова С.А. приведены результаты исследований по определению областей возникновения и существования разных видов феррорезонанса в сети 220кВ и значения феррорезонансного режима. В работе проведен количественный анализ феррорезонансных явлений с использованием математического моделирования и численного решения системы нелинейных дифференциальных уравнений. Определены значения токов, напряжений и их гармонический состав. По результатам расчета авторами были определены условия для возникновения наиболее тяжелого переходного процесса с наибольшей вероятностью возникновения устойчивого феррорезонансного режима.

Нами был проведен анализ феррорезонансных токов с целью определения технических требований прибора для выявления и подавления феррорезонанса. До настоящего времени токи при исследовании феррорезонанса не рассматривались, и прибор не был создан ни для определения напряжения, ни для определения тока.

В результате вычислительных экспериментов определено, что лучшую совокупность факторов: точность и время расчета имеют методы, предложенные Институтом Физики НАН Азербайджана.

-
- [1] *Баринов В.А., Савалов С.А.* Режимы энергосистем: Методы анализ и управления.-М.: Энергоатомиздат, 1990.-440с.
 - [2] Математическое моделирование установившихся режимов электрических систем переменного-постоянного тока. Г.Н.Лысяк, В.Н.Стряпан, А.В.Данилюк.-К.: УМКВО, 1990.104с.
 - [3] *Джуварлы Ч.М., Дмитриев Е.В., Гашимов А.М.* Задачи математического моделирования в проблеме повышения надежности электрических сетей высокого напряжения. Изв.АН Азербайджана.-1999,-№6.-с.128-133.
 - [4] *Джуварлы Ч.М., Дмитриев Е.В.* Математическое моделирование волновых процессов в электрических сетях.-Баку, Элм, 1975,-с.115.
 - [5] *Марчук Г.И.* Методы вычислительной математики.-М.:Наука, 1989.
 - [6] *Антонов Н.А.* Анализ феррорезонансных схем электрических сетей 110-500кВ методами математического моделирования: Дисс. кан.тех.наук: 05.14.02-ИГЭУ, 1998.-200с.
 - [7] Руководящие указания по предотвращению феррорезонанса в распределительных устройствах 110-500кВ с электромагнитными трансформаторами напряжения и выключателями, содержащими емкостные делители напряжения. Киев – 1995,с.28.
 - [8] *Джуварлы Ч.М., Дмитриев Е.В., Гашимов А.М., Садыгов Б.М.* Расчетные формулы для уравнений линий электропередачи с учетом поверхностного эффекта и короны//Техническая электродинамика.-1991,-№1.-с.85-92.
 - [9] *Hruck K., Rosenberger R., Dettman K.D., Kegel R.* Ferrorezonanz vor allem in Netzen mit Spannungswandlern. etz Bd.109(1988), H17,s.780-783.
 - [10] *Матханов П.Н.* Основы анализа электрических цепей , нелинейные цепи.-М.: Высшая школа, 1977.-272с.

- [11] *Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов.-М.:Наука, 1986.-544с.
- [12] *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике (для научных работников и инженеров).-М.:Наука, 1973.-832с.
- [13] *Чуа Л.О., Лин Пен-Мин.* Машинный анализ электронных схем: Алгоритмы и вычислительные методы. Перев.с англ.-М.:Энергия, 1980.-640с.
- [14] *Алексеев В.Г., Евдокимов С.А.* Условия феррорезонанса с трансформаторами напряжения в сети 220кВ.-Электрические станции, 1994,№109, с.54-57.

RIYAZI MODELLEŞDİRMƏ ÜSULU VASİTƏSİLƏ FERROREZONANS HADİSƏLƏRİNİN TƏHLİLİ

HƏŞİMOV A.M., BABAYEVA A.R.

Təqdim olunan ümumiləşdirilmiş məqalədə riyazi modelleşdirmə üsulu vasitəsilə ferreazonans sxemləri təhlil olunmuşdur. Göstərilir ki, ferreazonans hadisəsini qeydə alan və ondan mühafizəni təmin edən cihaza tətbiq olunan tələbləri müəyyənləşdirdikdə, ferreazonans cərəyanlarını prosesin əsas parametri kimi qəbul etmək olar.

ANALYSIS OF FERRORESONANCE PROCESSES BY THE MATHEMATICAL MODELLING METHODS

GASHIMOV A.M., BABAYEVA A.R.

In the given review the analysis of ferroresonance circuit diagrams by methods of mathematical modelling is resulted. It is shown, that ferroresonance currents as the key parameter of process can be used at definition of technical requirements of the device for revealing and suppression of ferroresonance.