

ФЕРРОРЕЗОНАНС В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 6-35 кВ

Быковский В.В., к.т.н., доцент, Чабан А.В.
Оренбургский государственный университет

1 Анализ проблемы феррорезонансных перенапряжений

1.1 Физическая сущность явления

В наши дни, одной из самых сложнейших и интереснейших проблем современных технических наук является исследование нелинейных процессов в различных системах. Все задачи физики нелинейны, однако часто линейзация уравнений, описывающих протекание тех или иных процессов может привести к удовлетворительному результату. Для повышения точности расчета необходимо вводить поправки в линейное решение. Однако во многих задачах линейзация не целесообразна, так как нелинейность приводит к возникновению явлений, невозможных в линейных системах. В электротехнике такими задачами являются колебательные процессы в электрических цепях, с катушками индуктивности с насыщающимся сердечником. Веберамперная характеристика такого элемента нелинейна. В цепях, содержащих емкостные и нелинейные индуктивные сопротивления, могут возникать феррорезонансные явления [1 - 4]. Различают феррорезонанс в параллельных и последовательных цепях (в зависимости от способа соединения элементов). Если при параллельном или последовательном соединении нелинейного индуктивного и емкостного сопротивления плавно изменять напряжение или ток источника питания можно наблюдать скачкообразное изменение значения силы тока в цепи или напряжения на элементах схемы. Это можно объяснить тем, что индуктивность катушки с ферромагнитным сердечником обладает нелинейной зависимостью от тока и при определенном его значении наступает компенсация индуктивной и емкостной проводимостей.

Более сложные явления, которые могут возникать в разветвленных цепях с различными схемами соединения нелинейных индуктивных и емкостных элементов, нельзя рассматривать отдельно как феррорезонанс напряжений или токов. В общем случае, феррорезонанс можно охарактеризовать как процесс скачкообразного перехода из режима сильного насыщения сердечника ферромагнитной катушки индуктивности в слабонасыщенный режим или наоборот [5]. Данный процесс сопровождается резкими колебаниями напряжения и тока в обмотке нелинейной катушки. В том случае, если изоляция обмотки катушки индуктивности не рассчитана на работу в режиме сильного насыщения, то перенапряжения и, как следствие, протекание через обмотку превышающих предельно допустимые значения токов, могут привести к разрушению изоляции обмотки и замыканиям между витками.

Термин «феррорезонанс» можно отнести ко всем нелинейным колебательным процессам в электрических цепях, которые должны содержать, по крайней мере:

- нелинейное индуктивное сопротивление;
- ёмкостное сопротивление;
- источник переменного напряжения;
- малые потери, которыми можно пренебречь.

Электрические сети содержат большое количество насыщающихся индуктивных элементов: силовые и измерительные трансформаторы, шунтирующие реакторы и т.д., а также емкостных элементов: силовые кабели, длинные воздушные линии, емкостные трансформаторы напряжения, батареи статических конденсаторов, выравнивающие ёмкости выключателей. Такие элементы потенциально могут являться и являются в реальности причиной возникновения феррорезонансных колебаний и возникающих вслед за ними перенапряжений

Основная особенность феррорезонанса – высокая вероятность возникновения нескольких устойчивых состояний при одинаковом наборе параметров схемы. Основные причины возникновения феррорезонанса – переходные процессы, являющиеся следствием грозовых и внутренних перенапряжений, коммутаций трансформаторов или нагрузки, возникновения или устранения короткого замыкания и т.д.

Если сравнить явления, которые протекают в линейных и нелинейных резонансных контурах, специфические особенности феррорезонанса выделяются особенно чётко.

В линейном резонансном RLC- контуре резонанс может возникнуть при любой амплитуде напряжения, а параметры элементов и резонансная частота контура связываются однозначным соотношением

$$L \cdot C \cdot \omega_p^2 = 1 \quad (1)$$

Характерные особенности феррорезонансных колебаний можно наглядно рассмотреть на примере свободных колебаний в LC - контуре на рисунке 1а при разряде емкости, заряженной до напряжения U_0 , на нелинейное индуктивное сопротивление.

Аппроксимированная кривая намагничивания катушки индуктивности представлена на рисунке 1б. Ниже приведены модельные расчеты для нелинейного контура со следующими параметрами:

$C = 10^{-3}$ Ф - емкость конденсатора;

$L_\mu = 1$ Гн - индуктивность нелинейной катушки на начальном участке;

$L_S = 0,01$ Гн - индуктивность насыщения катушки;

$\Psi_S = 1$ Вб - критическое потокосцепление;

$i_S = 1$ А - критический ток.

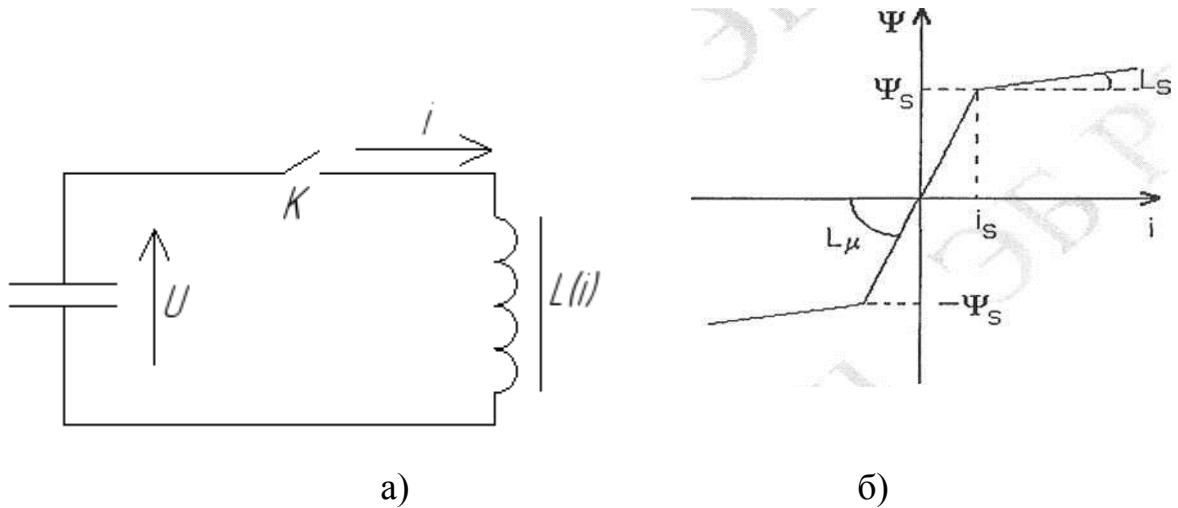


Рисунок 1 - Простейший феррорезонансный контур [1]

После замыкания ключа К в контуре возникают свободные колебания с начальной частотой $\omega_0 = 1/\sqrt{L_\mu C}$. Если максимальное значение тока $i_{max} = U_0 \omega$ не превосходит величины i_s [1], то частота колебаний сохраняет свое значение (рисунок 2а). Если в момент времени t_1 текущее значение тока превысит значение тока насыщения (рисунок 2б), то частота колебаний скачком изменяется до значения $\omega_s = 1/\sqrt{L_s C}$, и сохраняется до момента времени t_2 , когда текущее значение тока станет меньше величины i_s . Потерь в контуре нет, и, как следствие, процесс принимает периодический характер. Период колебаний описывается выражением $T = 2 \cdot \pi \sqrt{L_s C} + 2(t_3 - t_2)$, где промежуток времени от t_2 до t_3 соответствует ненасыщенному состоянию магнитопровода катушки индуктивности. Оценить этот промежуток можно следующим образом.

Приращение потока за время от t_2 до t_3 определяется выражением

$$\Delta \psi = 2\psi_s = \int_{t_2}^{t_3} u(t) dt \quad (2)$$

Если предположить, что за это время напряжение на емкости изменяется незначительно и принять его равным U_0 , то из данного выражения следует, что $t_3 - t_2 \approx 2\psi_s / U_0$. Чем выше начальное напряжение на емкости, тем меньше этот промежуток времени и тем меньше период колебаний, который в пределе стремится к величине $T = 2\pi \sqrt{L_s C}$ (рисунок 2в). Таким образом, частота колебаний в нелинейном колебательном контуре зависит от начального заряда на емкости и находится в пределах $\frac{1}{2\pi \sqrt{L_\mu C}} < f < \frac{1}{2\pi \sqrt{L_s C}}$

В реальном контуре всегда присутствуют активные потери, приводящие к тому, что напряжение при каждом перезаряде ёмкости уменьшается, а это, в свою очередь, приводит к уменьшению частоты колебаний. На рисунке 2г

показано напряжение на ёмкости при тех же начальных условиях, что и на рисунке 2б, но при активном сопротивлении контура $R = 1 \text{ Ом}$.

Если в контуре есть источник синусоидального напряжения, который компенсирует активные потери, то, при определенных условиях, частота колебаний в контуре может становиться равной частоте источника, если начальная частота больше частоты источника (рисунок 3а), или дольной частоты источника, если начальная частота меньше частоты источника (рисунок 3б). На рисунке приведены примеры гармонических и субгармонических феррорезонансных колебаний в последовательном контуре с синусоидальным источником с амплитудой 19 В. Остальные параметры схемы такие же, как и на рисунке 2г.

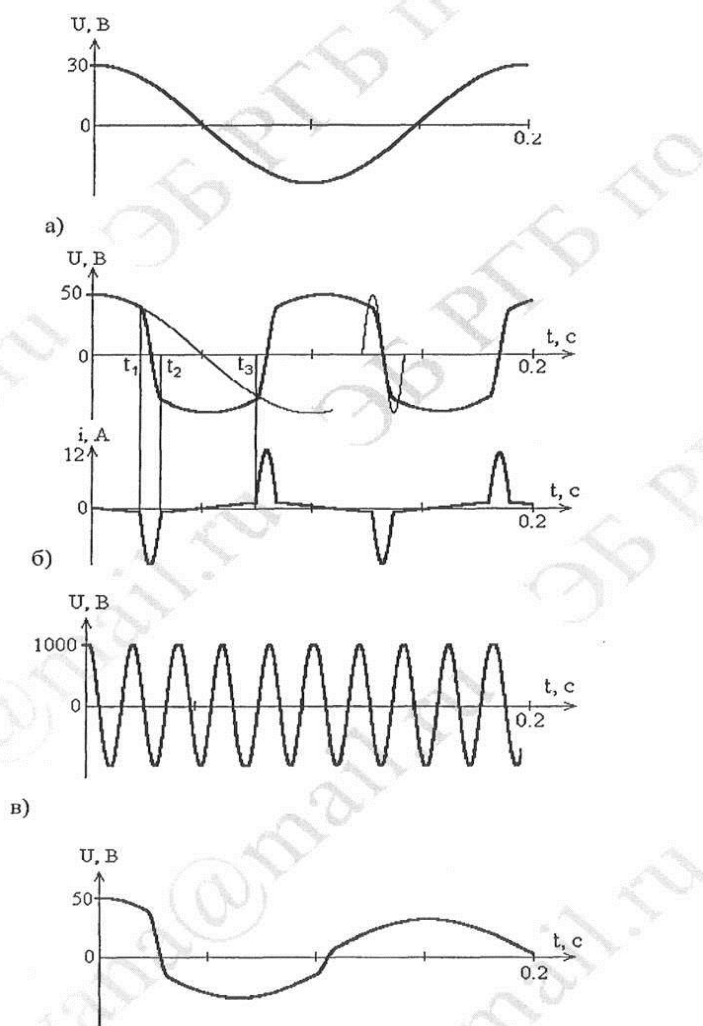


Рисунок 2 - Свободные колебания в последовательном феррорезонансном контуре [1]

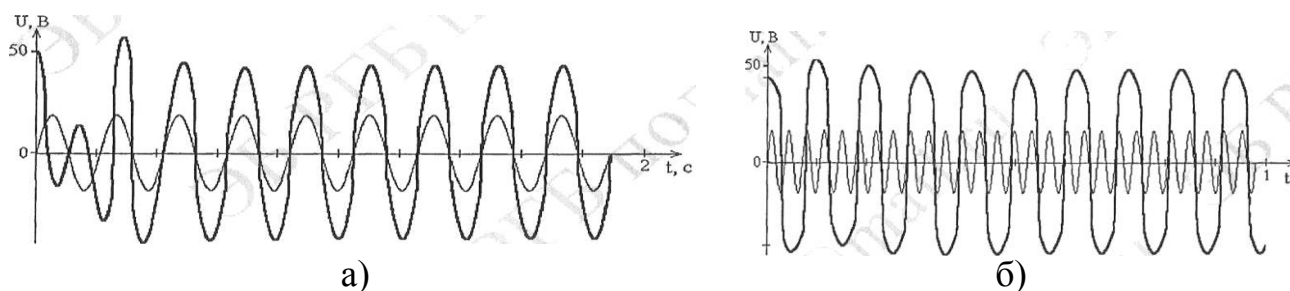


Рисунок 3 - Гармонические и субгармонические колебания в феррорезонансном контуре [1]

Резюмируя вышесказанное, мы можем перечислить основные отличия между феррорезонансным и линейным резонансным контурами:

- возникновение феррорезонанса на данной частоте возможно в широком диапазоне изменения ёмкости контура;
- возможно отличие частоты напряжения и тока в элементах контура от частоты синусоидального источника напряжения;
- в нелинейном контуре возможно существование нескольких устойчивых состояний при одной и той же конфигурации контура, и параметрах элементов. Одним из таких состояний является нормальный эксплуатационный режим системы, в то время как другие состояния являются нештатными и могут представлять опасность различной степени для элементов цепи. Начальные условия (заряд конденсаторов, остаточная намагниченность магнитопроводов трансформаторов, состояние коммутирующих устройств) определяют, какой из устойчивых режимов будет реализован.

В трехфазных цепях можно выделить два типа задач о феррорезонансных процессах. Первый тип относится к трехфазным сетям с глухозаземленной нейтралью, которые сводятся к однофазному представлению, описанному выше. Причинами возникновения феррорезонанса в таких сетях являются :

- отключение одной или двух фаз;
- перегорание фазных предохранителей;
- обрыв проводов ЛЭП и т.п.

Эквивалентный контур представлен на рисунке 4. В данном случае имеет место последовательный феррорезонанс нелинейной индуктивности трансформатора или реактора поврежденной фазы и конденсатора, являющего собой либо межфазную емкость проводов и ошиновки, либо емкость разъединителя. Для описания явления в данном случае достаточно двух дифференциальных уравнений первого порядка. Несмотря на кажущуюся простоту эквивалентной схемы, точного аналитического решения этой системы уравнений не существует, однако приближенные аналитические и графоаналитические методы применяются давно и достаточно успешно.

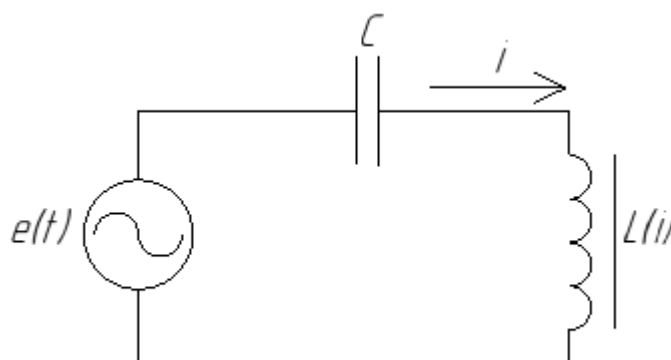


Рисунок 4 -Эквивалентный контур трехфазной сети
с глухозаземленной нейтралью [1]

1.2 Классификация феррорезонансных схем

Большие различия в характере проявления феррорезонансных явлений, конфигурации электрических схем, составе и характеристиках участвующего в них оборудования не позволяют исследовать и анализировать все феррорезонансные схемы какой-либо одной методикой. Поэтому обычно феррорезонансные схемы в электрических сетях классифицируются по следующим факторам:

- режиму работы электрических сетей;
- величине номинального напряжения оборудования и способу заземления нейтралей силовых трансформаторов;
- схеме электрических соединений и составу оборудования.

По режимам работы электрических сетей феррорезонансные схемы классифицируются следующим образом:

- схемы, образующиеся при нормальных эксплуатационных режимах работы электрических сетей, например, при оперативных переключениях на подстанциях;
- схемы, возникающие после ликвидации аварийного режима работы, например, после действия автоматического повторного включения линий электропередачи или после действия дифференциальной защиты шин;
- схемы, появляющиеся при аварийных режимах работы, к которым относятся неполнофазные включения линий электропередачи и перемежающие дуговые замыкания на землю.

Разделение феррорезонансных схем по величине номинального напряжения сети и способу заземления нейтралей силовых трансформаторов производится в соответствии с классификацией электрических сетей:

- схемы в сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью;
- схемы в сетях 6-35 кВ с компенсированной нейтралью;
- схемы в сетях 110 кВ с эффективным заземлением нейтрали;
- схемы в РУ 110-500 кВ с глухим заземлением нейтрали.

В представленном докладе рассматриваются вопросы, относящиеся к схемам с напряжением 6-35 кВ.

По схеме электрических соединений и составу электрооборудования можно выделить следующие феррорезонансные схемы [7]:

- схемы, образующиеся при последовательном соединении воздушных выключателей, содержащих емкостные делители напряжения, и электромагнитных трансформаторов напряжения;
- схемы, образующиеся при обрыве проводов воздушной линии электропередачи;

—схемы с неполнофазным питанием через воздушную линию электропередачи ненагруженных силовых трансформаторов с изолированной нейтралью;

—схемы, в которых происходит дуговое замыкание на землю с электромагнитными трансформаторами напряжения, служащими для контроля изоляции сети.

2 Меры предотвращения феррорезонанса в сетях 6-35 кВ

В исследованиях [1, 2] выделяются следующие меры по предотвращению феррорезонанса в сетях 6-35 кВ:

— добавление активного сопротивления в дополнительную обмотку трансформатора напряжения, соединённую в открытый треугольник, величиной в несколько десятков Ом (в основном – 25 Ом);;

— добавление последовательно с обмотками ВН каждой фазы активного сопротивления величиной несколько кОм;

— добавление в нейтральную точку соединения обмоток ВН ТН активного сопротивления величиной от 1 до десятков кОм.

Применение активных сопротивлений приводит к демпфированию феррорезонансных колебаний. При этом, необходимо заметить, что параметры активных сопротивлений, включаемых в цепь первичной и вторичной обмоток ТН с целью подавления ФРП, при проектировании должны быть минимально достаточными, поэтому их необходимо рассчитывать с учётом параметров конкретной сети, числа и характеристик трансформаторов напряжения в ней. За рубежом в настоящее время активно используются дополнительные активные сопротивления переменной величины (smartload) в ТН, величина которых изменяется в зависимости от режима работы сети [6]. Эффективность вышеуказанных мер, как правило, ограничивается требованиями к точности ТН как измерительного прибора, а также его тепловой стойкостью.

Необходимо отметить, что альтернативным решением для исключения опасных феррорезонансных колебаний в сетях 6–35 кВ является оснащение нейтрали сети высокоомным резистором. Следует, однако, учесть, что применение этой меры в ССН электрических станций, питаемых от трансформаторов СН, с обмотками низшего напряжения, соединёнными в треугольник, требует установки на шинах секции специального устройства трансформаторного типа для выделения нейтрали, например, ФМЗО.

Полезные рекомендации по предотвращению феррорезонансных перенапряжений и исключению повреждений ТН в сетях 6 - 10 кВ также предлагаются в методических указаниях по применению ограничителей перенапряжений нелинейных в электрических сетях 6-35 кВ [8].

Список литературы

1. Селиванов Василий Николаевич. Исследование феррорезонансных колебаний в воздушных сетях 35 КВ с изолированной нейтралью с электромагнитными трансформаторами напряжения: Дис. ... канд. техн. наук: 05.14.12 : Апатиты, 2003 179 с. РГБ ОД, 61:04-5/1832

2. Лаптев О. И. Исследование эффективности антирезонансных трансформаторов напряжения типа НАМИ в сетях 6-35 кВ с изолированной нейтралью / О. И. Лаптев // «Ограничение перенапряжений. Режимы заземления нейтралей. Электрооборудование сетей 6-35 кВ». Труды четвёртой Всероссийской научно-технической конференции. -Новосибирск, 2006.-С.90-96.
3. Сиротинский Л.И. Перенапряжения и защита от перенапряжений в электрических установках. М., Л.: Госэнергоиздат, 1932. 463с.
4. Информационное сообщение ОРГРЭС, № Э-11/60.
5. Алексеев В.Г., Зихерман М.Х. Феррорезонанс в сетях 6-10 кВ // Электрические станции, 1979, №1, С.63-65.
6. Базанов В.П., Путова Т.Е. О режимах работы трансформаторов напряжения // Электрические станции, 1987, №2, С.56-58.
7. Беляков Н.Н. Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6 и 10 кВ с изолированной нейтралью // Электричество, 1957, №5, С. 18-23.
8. Методические указания по применению ограничителей перенапряжений нелинейных в электрических сетях 6-35 кВ: РАО «ЕЭС России», 2001. 29 с.