

ФЕРРО-ДАМП АКТИВНОЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСНОЕ УСТРОЙСТВО

СОДЕРЖАНИЕ

Явление феррорезонанса _____	3
Решения _____	11
Ферро-Дамп: Активное феррорезонансное устройство _____	13
FAQ's _____	19

ЯВЛЕНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСА

ВВЕДЕНИЕ

Электрические сети состоят из большого числа индуктивностей (силовых трансформаторов, измерительных индуктивных трансформаторов напряжения, токоорганичивающих реакторов), а также конденсаторы (кабели, длинные линии, емкостных трансформаторов напряжения, статические конденсаторы, конденсаторы для выравнивания напряжения в автоматических выключателях). Таким образом, появляются случаи, при которых может произойти такое явление как феррорезонанс. Главной особенностью этого явления является то, что возможен более чем один стабильный установившийся режим отклика для одних и тех же параметров сети. Кратковременные перенапряжения, подключаемые или выключаемые трансформаторы или нагрузки, появление или устранение неисправностей и т.д. могут стать причиной феррорезонанса. Отклик может внезапно переходить от одного нормального устойчивого состояния отклика (синусоидальный на той же частоте, что и источник) в другое Феррорезонансное устойчивое состояние отклика, характеризующиеся высокими перенапряжениями и уровнями гармоник, которые могут привести к серьезным повреждениям оборудования.

РЕЗОНАНС - ФЕРРОРЕЗОНАНС

В резонансном контуре, индуктивное и емкостное реактивные сопротивления цепи равны друг другу (1). Единственное противодействие току - это сопротивление цепи, что приводит к нежелательным перенапряжениям и перегрузкам по току на резонансной частоте (2). Этот резонансный эффект представляет один из режимов работы, и его последствия смягчаются посредством контроля частоты системы или путем введения чистых сопротивлений.

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (1)$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

Феррорезонанс это резонансная ситуация с нелинейной индуктивностью, так что индуктивное сопротивление зависит не только от частоты, но также и от магнитной индукции железного сердечника катушки (например, железного сердечника трансформатора). Индуктивное сопротивление представлено кривой насыщения магнитной индукции железного сердечника. Теоретически, это нелинейная индуктивность может быть представлена двумя индуктивными сопротивлениями, в зависимости от кривой насыщения.

ЯВЛЕНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСА

Подобно резонансу, который зависит от связи между емкостью и нелинейной индуктивностью, феррорезонанс может быть последовательным или параллельным.

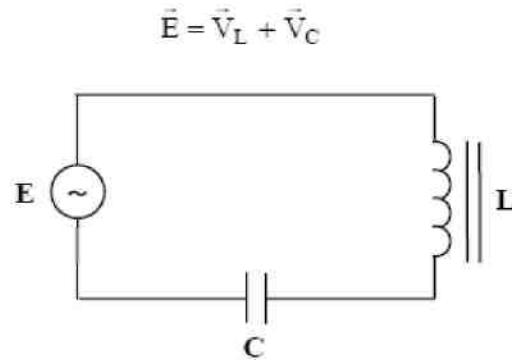


Рис.1. Последовательная феррорезонансная цепь

Рисунок 2 (а) показывает графическое решение последовательной феррорезонансной цепи. Возможные рабочие точки получены как пересечение линий V_L и $E+V_C$, где E - источник напряжения, V_C - напряжение емкости и V_L - индуктивное напряжения (рис. 2а). Еще один способ для представления этого графическое решение состоит из предыдущего расчета линии E , как это показано на рисунке 2 (б) [3]. Оба представления показывают три возможные точки работы.

- Точка работы 1: Неферрорезонансная стабильная точка работы. Это индуктивная ситуация ($X_{L-linear} > X_{Cf}$ $E = V_L - V_C$).
- Точка работы 2: Феррорезонансная стабильная точка работы. Это емкостная ситуация ($X_{L-sat} < X_{Cf}$ $E = V_C - V_L$).
- Точка работы 3: Нестабильная точка работы.

Как видно на этих рисунках, основное свойство Феррорезонансных цепей это представление, по крайней мере, двух устойчивых рабочих состояний при резких скачках напряжения или тока от одного устойчивого режима работы на другой.

ЯВЛЕНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСА

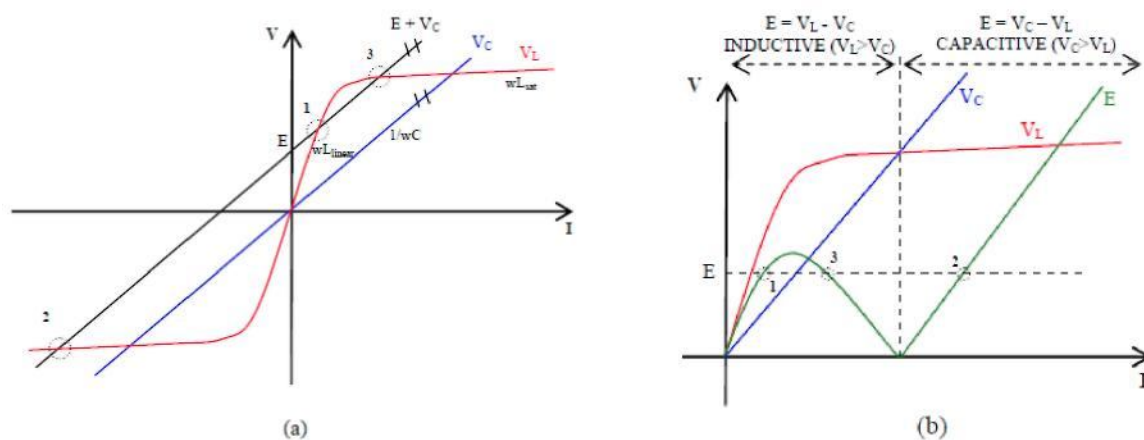


Рис.2. Графическое решение последовательной феррорезонансной цепи

Можно проверить, что шаг от неферрорезонансной рабочей точки до феррорезонансной совпадает с шагом от индуктивной ситуации до емкостной (рис. 2б). Конечная рабочая точка будет зависеть от начальных условий (остаточного потока, значения емкости, источника напряжения, момента переключения ...). Таким образом, при определенных начальных условиях (например, переходных перенапряжениях), может появиться феррорезонанс. Эта феррорезонансная точка доходит до ситуации перенапряжения и перегрузки по току. Как только появился феррорезонанс, система продолжает работать с феррорезонансом, пока источник не сможет обеспечить необходимую энергию для поддержания данного явления.

ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ НАПЯЖЕНИЯ

В связи со множеством различных источников емкостей и нелинейных индуктивностей в реальной электрической сети и широком диапазоне условий эксплуатации, конфигураций, при которых возникает феррорезонанс, бесчисленны. Однако, опыт позволил перечислить основные типичные конфигурации, которые могут привести к феррорезонансу. Некоторые стандартные примеры приведены ниже.

Трансформатор напряжения питается от выравнивающейся емкости одного (или более) открытого выключателя(ей):

В трансформаторах напряжения, обязательные операции переключения (отключение шины или включение шины автоматическим выключателем, устранение неисправности на шине...) могут управлять трансформаторами напряжения, подключенными между фазами и землей в феррорезонанс.

ЯВЛЕНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСА

Эти конфигурации можно проиллюстрировать с помощью схемы на рисунке 3. Открытие выключателя D инициирует явление, вызывая разряд емкости C через трансформатор напряжения, который затем приводится в насыщение. Источник дает достаточно энергии через выравнивающую емкость C_d для поддержания колебаний. Емкость C совпадает со всеми заземленными емкостями трансформатора напряжения и соединением, выполняемого посредством выравнивающих емкостей открытого выключателя(ей).

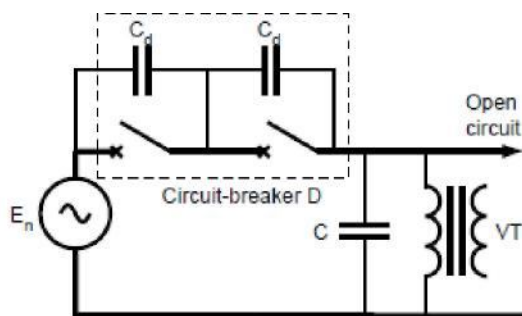


Рис.3. Феррорезонанс трансформатора напряжения, соединенного последовательно с разомкнутым выключателем

Трансформаторы напряжения, подключенные к изолированной нейтрали:

Эта система заземления может быть выбрана или может быть результатом соединения аварийного источника изолированной нейтралью или от потери системой заземления. Переходные перегрузки по напряжению или току из-за переключений в системе питания (сброс нагрузки, удаление ошибок...) или из-за замыкания на землю, могут инициировать явление при постепенном насыщении железного сердечника одного или двух трансформаторов напряжения параллельной Феррорезонансной схемы соединения, показанной на рисунке 4. Затем феррорезонанс наблюдается как на напряжении фаза-земля, так и на напряжении в нейтральной точке. Нейтральная точка смещается и потенциал одной или двух фаз поднимается по отношению к земле, который может создать впечатление ошибки фаза-земля в системе. Значения перенапряжения может превышать нормальное напряжение фаза-фаза в установившемся стабильном режиме, и вызвать диэлектрическое разрушение электрооборудования.

ЯВЛЕНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСА

Несбалансированные системы:

Несколько примеров конфигураций при этом риске приведены на рисунке 5. Эти конфигурации могут возникать, когда одна или две из исходных фаз пропадают, в то время как трансформатор разгружен или слегка нагружен, в результате перегорания пробок энергосистемы среднего напряжения, разрыва проводника или производимых работ, например, при вводе в эксплуатацию кабинки с пультом удаленного управления. Емкости могут быть в виде емкости подземного кабеля или воздушной линии, подающей на трансформатор, у которого первичные обмотки соединены звездой с изолированной или заземленной нейтралью, или же они имеют соединение дельта. Например, последовательные феррорезонансные цепи состоят из последовательного соединения между емкостями фаза и земля (между выключателем и трансформатором) открытой фазы и намагничивающего импеданса трансформатора. Емкости фаза-фаза и фаза-земля, соединения первичной и вторичной обмотки, конфигурации сердечника (три одиночные фазы, порошкообразный или искусственный порошкообразный), заземление на нейтраль источника напряжения системы (глухое заземление, заземление, изолированное) и режим питания (одна или две фазы под напряжением) - факторы, влияющие на создание данного состояния системы. Изолированная первичная нейтраль более восприимчива к феррорезонансу.

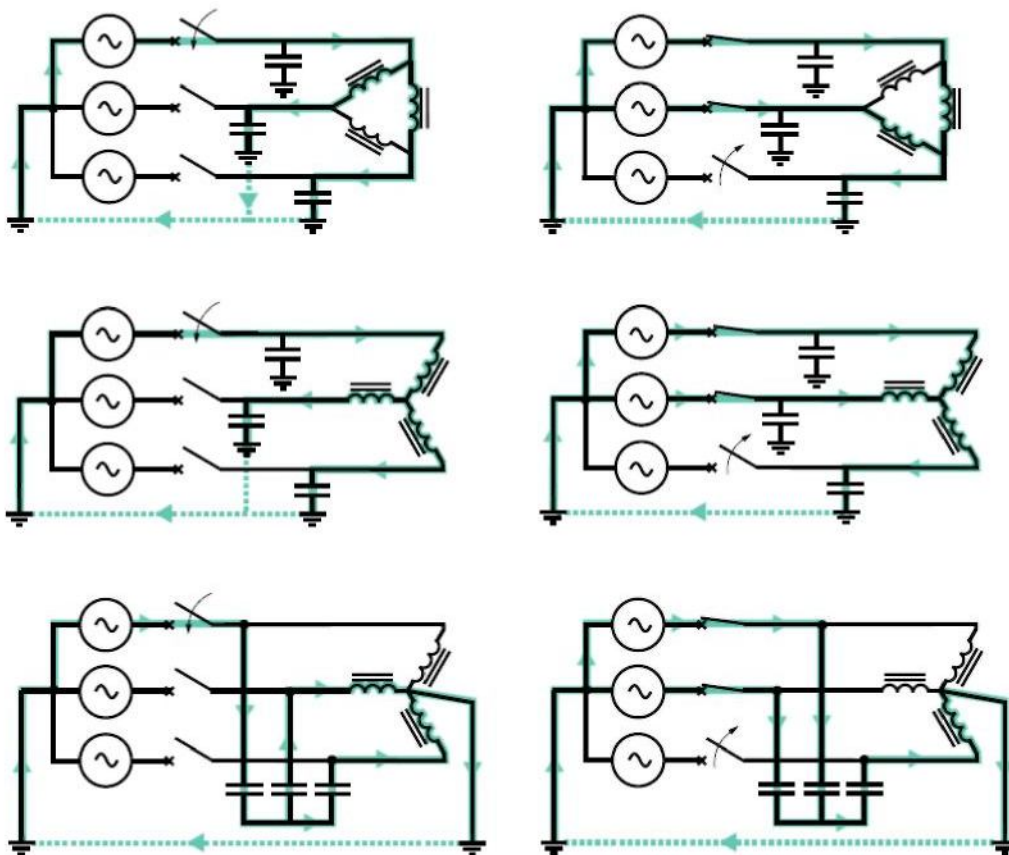


Рис.5. Примеры несбалансированных систем с риском возникновения феррорезонанса

ЯВЛЕНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСА

Трансформаторы напряжения и трансформаторы высокого / среднего напряжения с изолированной нейтралью:

Феррорезонанса может произойти, когда нейтрали высокого и среднего напряжения изолированы, и ненагруженные трансформаторы напряжения соединены на стороне среднего напряжения между фазой и землей (см. рис. 6). Когда происходит замыкание на землю на стороне высокого напряжения выше трансформаторной подстанции, нейтраль высокого напряжения поднимается до высокого потенциала. По емкостному эффекту между первичной и вторичной обмотками, появляются перенапряжения на стороне среднего напряжения, и может вызвать феррорезонанс цепи, складывающийся из источника напряжения E_0 , емкостей C_E и C_0 и индуктивности трансформатора напряжения. После того, как ошибка высокого напряжения удалена, напряжения нейтрали высокого напряжения за счет естественного дисбаланса системы может быть достаточно для поддержания этого явления.

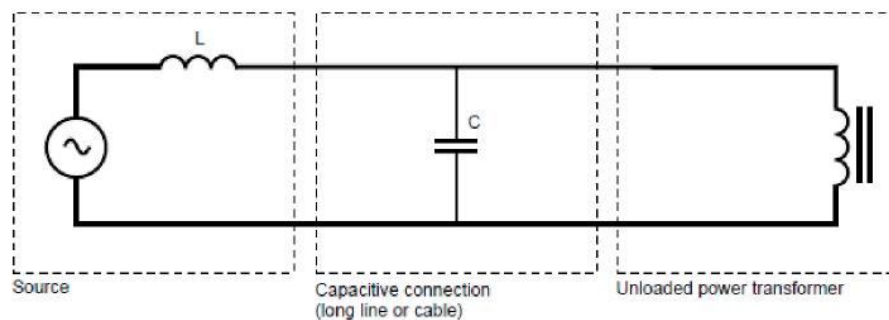


Рис. 6. Феррорезонанс трансформатора напряжения между фазой и землей с трансформатором с изолированными нейтралью.

Трансформатор заряжаемый высоко емкостной энергосистемой с малой мощностью короткого замыкания:

Феррорезонанс может произойти, когда ненагруженный силовой трансформатор вдруг подключен к источнику питания с малой мощностью короткого замыкания по сравнению с номинальной мощностью трансформатора при подключении через подземный кабель или длинную воздушную линию. Это относится, например, к обслуживанию сетей среднего напряжения (подземный кабель) городских или промышленных электрических сетей, но также и к длинным сельским общественным электрическим сетям среднего напряжения (см. рис.7), или, где подземные кабели находят все большее применение (из-за их надежности и эстетики).

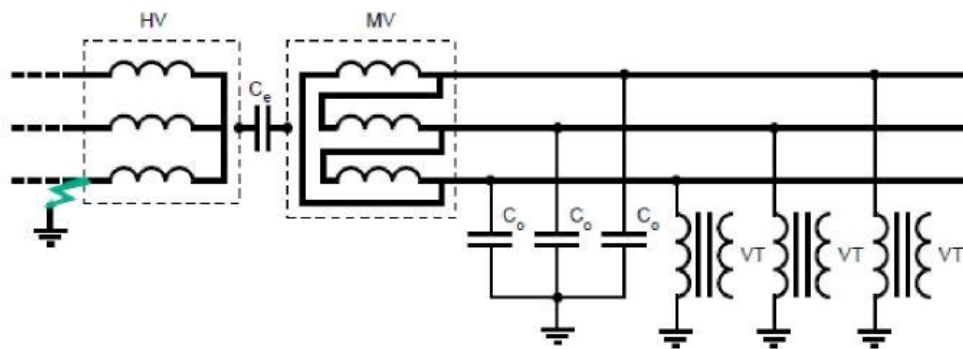


Рис. 7. Эквивалентная диаграмма ненагруженного силового трансформатора снабжаемого емкостной системой

Вкратце:

- Конфигурации, при которых может возникнуть феррорезонанс, безграничны.
- Есть много различных типов феррорезонанса: однофазный, трехфазный, общий режим, режим дифференциала.
- Однако, опыт позволяет выявить некоторые рисковые конфигурации систем, которым необходимо особое внимание. Это такие системы как:
 - Трансформатор напряжения подключен между фазой и землей на изолированную нейтральную систему,
 - Трансформатор снабжается через длинные и/или емкостные линии,
 - Защита предохранителя с плавкой вставкой, перегорание которого приводит к немногочисленному выключению,
 - Без нагрузки или с малой нагрузкой силовые трансформаторы или измерительные трансформаторы напряжения.
- Явления, скорее всего, вызывающие феррорезонанс:
 - Переключения конденсаторных батарей и ненагруженных линий,
 - Повреждения изоляции,
 - Молнии,
 - Переключения ненагруженных трансформаторов.

Согласно "IEC 71: Координация изоляции" стандартные, временные феррорезонансные (и резонансные) перенапряжения "должны быть предотвращены или ограничены". "Обычно они не должны рассматриваться как основание для останова номинального напряжения, или для проектирования изоляции, если только эти меры не являются достаточными". Это означает, что процедура координации изоляции обычно не учитывает уровни перенапряжений из-за феррорезонанса, и как следствие, стабилизаторов напряжения (чьи остаточные напряжения, как правило, выше, чем перенапряжения из-за феррорезонанса) теоретически не обеспечивают защиту от феррорезонанса.

Способ решения проблемы

Согласно всему вышесказанному, риск феррорезонанса должен быть принят во внимание, и его следует гасить. Гасить колебания трудно из-за компактной конструкции современных трансформаторов напряжения и высокого качества магнитного материала (низкие потери).

Наиболее распространенным решением, за исключением конструктивных решений, является использование демпфирующего резистора с дополнительным открытым дельта соединением на трансформаторах напряжения, как показано на рис.8.

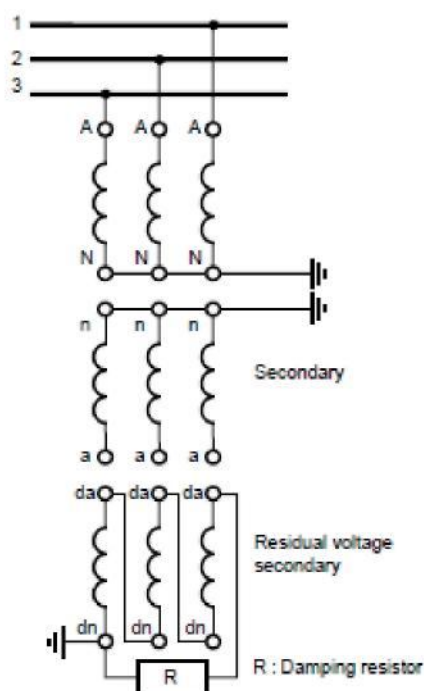


Рис.8. Решение с демпфирующим резистором для феррорезонанса

Предыдущие исследования и опыт эксплуатации показали, что сопротивление демпфирующего резистора является очень важным критерием для демпфирования феррорезонанса. Для того чтобы иметь быстрое и наиболее безопасное демпфирование, величина резистора должна быть как можно меньше. Тем не менее, очень низкое значение сопротивления вызывает некоторые другие большие проблемы, такие как перегрузка трансформаторов напряжения в несбалансированной ситуации и перегрев. Это вызывает не только повышение температуры трансформатора напряжения, но и резистора и весь прилегающий участок, который может повредить другое оборудование. Кроме того, низкое сопротивление требует гораздо более мощных и крупных резисторов для управления при нестабильном состоянии, в котором нужно больше пространства для использования распределительного устройства. Кроме больших энергетических потребностей, исследования показали, что низкая мощность, такая как <20 Вт достаточно для демпфирования состояния феррорезонанса.

При использовании демпфирующих резисторов, они должны быть правильно рассчитаны и иметь значения для определенного проекта и трансформатора напряжения, в следствие чего происходит изменение резисторов на проекте и в процессе сборки.

Способ решения проблемы

Принимая во внимание все негативные моменты демпфирующих резисторов, с помощью электронной схемы, «Ферро-Дамп» Активный феррорезонансный демпфер разработан в качестве гораздо более эффективной альтернативы статических демпфирующих резисторов.

Источники:

Cahier technique no. 190, Ferroresonance - Ph. Ferracci

Ferroresonance Experience in UK: Simulations and Measurements – Z. Emin, Y. K. Tong

Ferroresonance in Voltage Transformers: Analysis and Simulations - V. Valverde, A.J. Mazon, I. Zamora, G. Buigues

Mitigating Ferroresonance in HV inductive transformers - W. Piasecki, M. Stosur, M. Florkowski, M. Fulczyk, B. Lewandowski

Ferroresonance prevention in MV voltage transformers - Wojciech Piasecki, Marek Florkowski, Marek Fulczyk, Pentti Mahonen, Mariusz Luto, Wieslaw Nowak, Otto Preiss

ФЕРРО-ДАМП: АКТИВНЫЙ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫЙ

ДЕМПФЕР Ферро-Дамп: Активный Феррорезонансный

Демпфер

ОПИСАНИЕ

Ферро-Дамп – это активная нагрузочный инструмент, который устраняет нежелательные всплески, и защищает трансформатор напряжения при феррорезонансе. Главной особенностью Ферро-Дампа является то, что он распознает является ли неисправность несбалансированной ситуацией или происходит феррорезонанс. С помощью схемы электронного управления, устройство контролирует открытое дельта напряжение трансформаторов напряжения в реальном времени, и если оно ниже установленного порогового напряжения, Ферро-Дамп остается в автономном режиме. Пороговое напряжение задано 20-24В, это означает, что ниже этой точки устройство показывает трансформаторам напряжения, нагрузки нет. Так устройство не показывает никаких действий против естественной асимметрии системы, вызванной

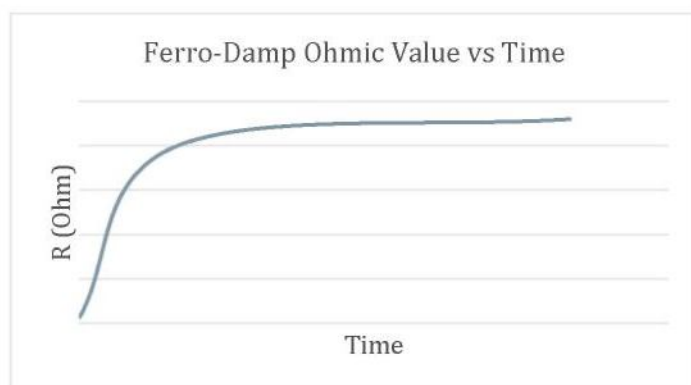


Рис.8. Кривая зависимости R от времени для Ферро-Дампа при неисправном состоянии

неуравновешенностью фаз. Когда входное напряжение превышает пороговое напряжение, устройство активируется и демпфирующее действие реализуется. Он показывает очень низкое сопротивление для лучшего затухания ($<7\Omega$) феррорезонанса. Если неисправность не устраняется в течение некоторого времени (в зависимости от тока неисправности), он распознает неисправность, как короткое замыкание на землю и в целях защиты

трансформатора напряжения от перегрузки и перегрева, устройство увеличивает сопротивление до высокоомных значений ($\gg 200\Omega$). Рис. 8. показывает кривую зависимости R от времени для Ферро-Дампа при неисправном состоянии. Значения R и t зависят от неисправности.

Устройство оснащено светодиодным индикатором. Как только оно распознает демпфирование феррорезонанса в кратчайшее время красный светодиод в основном указывает замыкания на землю, чем пороговое напряжение.

ОСОБЕННОСТИ - ПРЕИМУЩЕСТВА

Благодаря активному гашению и компактному дизайну, особенности и преимущества Ферро-Дампа над демпфирующими резисторами кратко описаны ниже:

- **Лучше демпфирование феррорезонанса, чем демпфирующие резисторы из-за его низкого сопротивления, когда наблюдается феррорезонанс**

При низком начальном сопротивлении при феррорезонансе, Ферро-Дамп может устранить феррорезонанс в очень короткое время и предотвратить повреждение соответствующего оборудования. Это начальное сопротивление значительно выше в стандартных демпфирующих резисторах, у которых меньшая возможность исключить феррорезонанс в критический момент.

- **Лучшая энергетическая безопасность при замыкании на землю из-за высокого сопротивления во время замыкания на землю**

С помощью схемы управления, Ферро-Дамп распознает феррорезонанс или замыкание на землю, и если это замыкание на землю, устройство увеличивает его сопротивление к более высоким Ом для защиты соответствующих устройств от любой перегрузки или перегрева. Стандартные демпфирующие резисторы должны иметь низкое сопротивление для хорошего демпфирования феррорезонанса, но это вызывает перегрузку при замыкании на землю для трансформаторов напряжения. Ферро-Дамп решает эту проблему с помощью работы в качестве активной нагрузки в соответствии с условиями неисправностей. Так как нет дополнительной нагрузки и нагрева при замыкании на землю, нет необходимости в дополнительном охлаждении или монтаже устройства в более холодных областях.

- **Один Ферро-Дамп для всех значений вторичных напряжений между 100V-200V**

Благодаря своей схеме электронного управления, Ферро-Дамп исключает феррорезонанс независимо от уровней вторичного напряжения на трансформаторах напряжения. Поскольку устройство работает между 20В-24В, его можно использовать с любым трансформатором напряжения со значением вторичного напряжения 100 V-200 V (L-L). Это означает, что различные типы демпфирующих резисторов могут быть заменены всего лишь одним устройством.

- **Может быть установлен низковольтной частью на DIN-рейку**

Ферро-Дамп можно легко установить на А DIN-рейку в низковольтной части, так как трудно устанавливать демпфирующие резисторы на панели из-за их размера и тепловыделения.

- **Малый размер по сравнению с демпфирующими резисторами**

Имея небольшие и компактные размеры Ферро-Дамп представляет собой отличное решение для небольших распределительных устройств.



Рис.9. Сравнение по размеру Ферро-Дампа и демпфирующих резисторов

- **Один Ферро-Дамп для защиты трех трансформаторов напряжения с открытым дельта соединением**

С открытым дельта соединением, только Ферро-Дамп защищает все 3 трансформатора напряжения в системе. Это является значительным преимуществом для таких систем, где необходимо использовать различные демпфирующие резисторы для каждой фазы.

- **Не влияет на другие устройства защиты от замыканий на землю**

Ферро-Дамп можно безопасно использовать в открытых дельта обмотках с другими защитными устройствами без какого-либо влияния на них.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

- Номинальное напряжение : 100 – 200 В
- Частота : 50-60 Гц
- Неактивный интервал : 0 – 20 В
- Время затухания при 100 В : 1 с
- IP Класс : IP20
- Температура окружающей среды : -10°C до +55°C
- Температура хранения: -20°C до +70°C
- Влажность : до 90%
- Установка : 35 мм DIN шина (DIN EN 50 022)
- Тип подключения : Винт, 0.5 - 2.5 мм² провод
- Красный светодиод : индикация замыкания на землю
- Размеры : 69 × 86 × 55 мм
- Вес : 0.05 кг

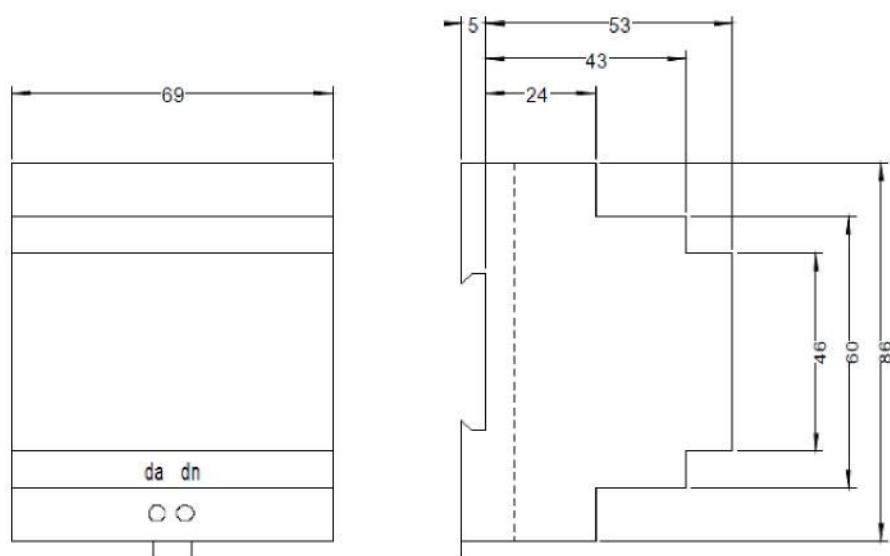


Рис.10. Габаритные размеры

ФЕРРО-ДАМП: АКТИВНЫЙ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫЙ ДЕМПФЕР

СХЕМА ПОДКЛЮЧЕНИЯ

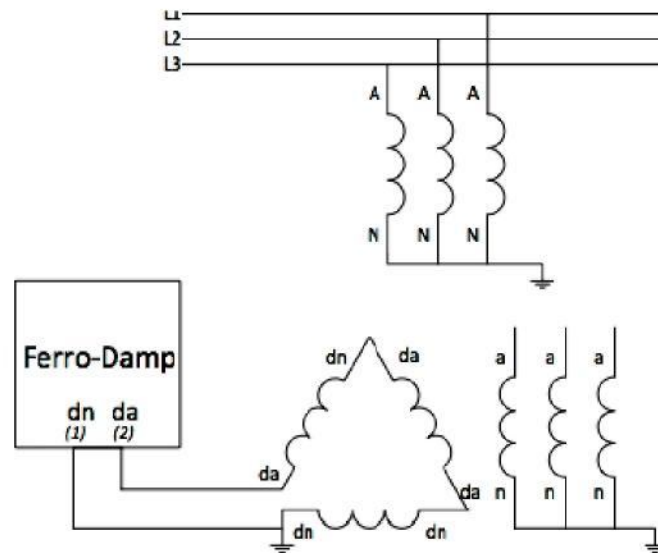


Рис.11. Схема подключения

A, N: Трансформатор напряжения, Высоковольтные вводы

a, n: Вторичная измерительная обмотка

da, dn: Вторичные защитные вводы обмотки

Ферро-Дамп (1), (2): Входы активного феррорезонансного демпфера

FAQ's

- **Сколько энергии рассеивается при демпфировании?**

Ферро-Дамп имеет два рабочих этапа, низкоомный демпфирующий резистор для эффективного сброса и высокоомной тепловой защиты. Тепловая защита срабатывает в соответствии с уровнем напряжения. При работе в стадии тепловой защиты, устройство увеличивает сопротивление, и это снижает ток. Пластиковая коробочка Ферро-Дамп – это около 50С во время замыкания на землю. Ферро-Дамп нечувствителен к асимметрии сети, так как его пороговое напряжение в пределах 20-24В.

- **Принимая во внимание время замыкания на землю, насыщение может произойти во время перенапряжения от замыкания на землю, может ли Ферро-Дамп эффективно работать при таких условиях?**

В ходе первой части оборудования имеет низкое сопротивление, тогда термисторы, имеющие положительный температурный коэффициент, внутри устройства становятся теплее и увеличивают его сопротивление, чтобы защитить трансформатор напряжения от перегрузки. После того, как замыкание на землю устранено, Ферро-Дампу требуется около 2 минут, чтобы остыть и понизить резистивное значение. Так же как и трансформатор напряжения, Ферро-Дамп способен выдерживать замыкания на землю (как правило, $1,9 U_n/8h$). Явление Феррорезонанса может произойти только в незаземленных или ненапрямо заземленных сетях. При замыкании на землю система напрямую заземлена и феррорезонанс не может произойти.

- **Имеет ли Ферро-Дамп какое-либо воздействие на другие устройства защиты, которые соединены с той же открытой дельта обмоткой?**

Нет, Ферро-Дамп не имеет никакого влияния на другие устройства защиты от замыканий на землю, так как соединен параллельно с ними, и имеет тот же уровень напряжения с другими защитными устройствами.

- **Влияет ли интервал возникновения и число на срок службы Ферро-Дампа?**

Нет, нет измеренной и экспериментальной зависимости срока службы Ферро-Дампа от интервала феррорезонанса.