



В. П. Базанов



Д. А. Пигалов

## О некоторых особенностях эксплуатации распределительных сетей, работающих с изолированной нейтралью

БАЗАНОВ В. П., ПИГАЛОВ Д. А., ЧОУ ДПО «Нижегородский УЦ «Энергетик»  
603052, г. Нижний Новгород, ул. Сормовское шоссе, д. 26А; Bazanov-VP@nn.mrsk-cp.ru

Проведён анализ некоторых нештатных ситуаций, наблюдавшихся при эксплуатации распределительных электросетей 6 – 35 кВ, которые обусловлены резонансными явлениями, возникающими вследствие нарушений требований Правил технической эксплуатации в части настройки дугогасящих реакторов (с недокомпенсацией). В этом случае сеть предрасположена к неконтрольному резонансу напряжений, приводящего к значительному смещению нейтрали сети. Рассмотрены также нештатные ситуации вследствие включения «холостых» шин под рабочее напряжение — феррорезонансные явления. В этих случаях приборы и предупредительная сигнализация ведут себя так, как если бы в сети имеет место однофазное замыкание на землю («земля» в сети), что не всегда соответствует действительности. В заключение даны рекомендации по действиям оперативного персонала в таких ситуациях.

**Ключевые слова:** дугогасящий реактор, напряжение несимметрии, режим недокомпенсации, неконтрольный резонанс, напряжение смещения нейтрали, резонанс токов, резонанс напряжений, феррорезонанс.

**П**рактика эксплуатации распределительных электросетей 6 – 10 – 35 кВ высокого напряжения показывает, что в ряде случаев в сетях возникают нештатные ситуации, которые ошибочно интерпретируются оперативным персоналом как «земля» в сети. Они проявляются в виде «перекаса» фазных напряжений, а иногда работает сигнализация о появлении напряжения на дополнительной обмотке измерительных трансформаторов напряжения (ТН), т. е. имеют место признаки однофазного нарушения изоляции, хотя это не всегда так.

Известно и определённым образом это отражено в Правилах технической эксплуатации (ПТЭ) [1] и в ряде других технических публикаций, что при определённых состояниях схем сетей и схем подстанций могут возникать резонансные и феррорезонансные явления. Указанные состояния — как правило, следствие изменения положения коммутационных аппаратов под напряжением.

Рассмотрим, при каких условиях возникают резонансные или феррорезонансные явления, а также рекомендации по действию оперативного персонала в указанных нештатных ситуациях. Прежде обратим внимание на некоторые требования [1], изложенные

в п. 5.11.10, п. 5.11.11 и касающиеся режимов настройки дугогасящих реакторов (ДГР):

1. «Дугогасящие реакторы должны иметь резонансную настройку с сетью. Работа с недокомпенсацией ёмкостного тока ... не допускается»;
2. «В сетях, работающих с компенсацией ёмкостного тока, напряжение несимметрии в сети ( $U_{нс}$ ) должно быть не выше 0,75 % фазного напряжения»;
3. «При отсутствии в сети замыкания на землю напряжение смещения нейтрали ( $U_{см}$ ) допускается не выше 15 % фазного напряжения...».

Эти довольно жёсткие и категоричные требования обусловлены необходимостью минимизировать последствия резонансных состояний, которые возникают вследствие взаимодействия ёмкости присоединённой сети и индуктивности ДГР. При несоблюдении (нарушении) указанных требований могут появиться условия, когда распределительная сеть окажется в ситуации неконтрольного резонансного состояния. Неконтрольные резонансы создают опасные напряжения смещения нейтрали схемы сети и аварийные ситуации со всеми последующими негативными

(опасными, трагическими, затратными и пр.) проявлениями.

Прежде, чем провести анализ физических процессов, обуславливающих обязательное выполнение приведённых требований [1], кратко изложим физическую суть таких состояний электрических схем как «резонанс токов» и «резонанс напряжений». Данные состояния представляют собой линейные резонансы, где осциллограммы токов и напряжений в рассматриваемых схемах имеют форму синусоид промышленной частоты. На рис. 1 представлены схемы, иллюстрирующие резонансные состояния.

На схеме (рис. 1, а) показана ситуация, когда ДГР (индуктивность  $L$ ) настроен в резонанс с ёмкостью сети  $C$  в случае однофазного замыкания на

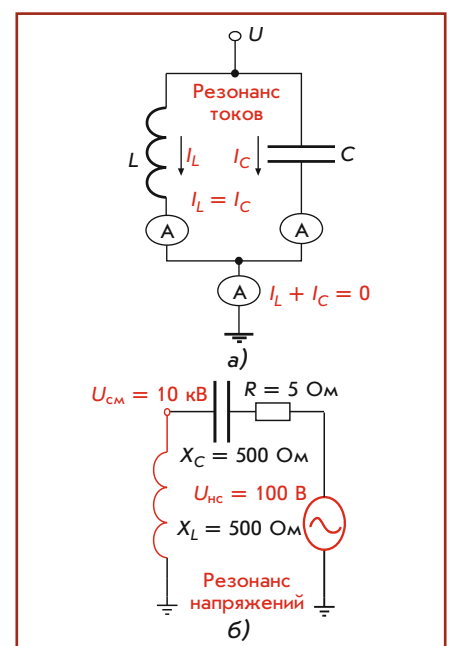


Рис. 1. Резонансные состояния токов (а) и напряжений (б)

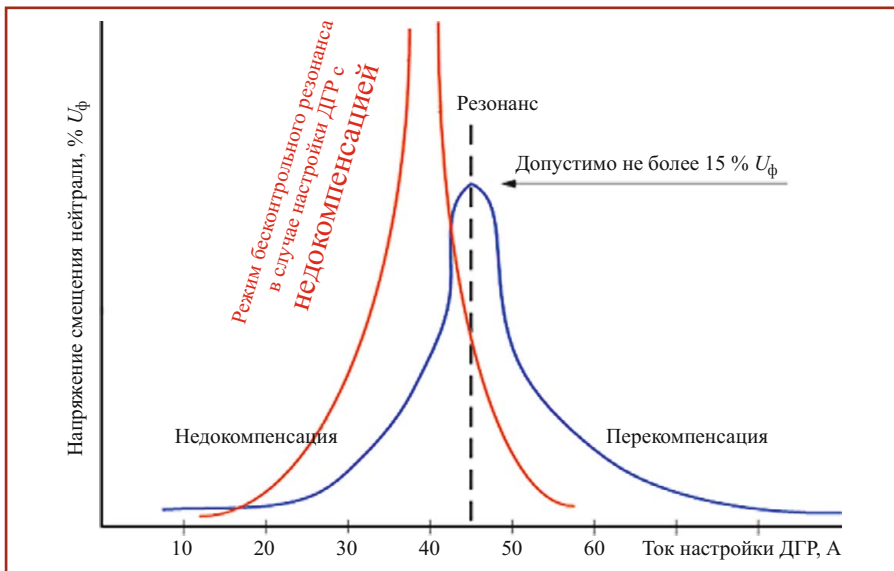


Рис. 2. График бесконтрольного вхождения ДГР в резонанс напряжений

землю (ОЗЗ). Видно, что непосредственно через место замыкания ток не протекает. Следовательно, исключены (минимизирована) опасность шаговых напряжений, (минимизировано) термическое разрушение железобетонных опор, переход грозовых импульсных перекрытий линейной изоляции в устойчивую дугу ёмкостного тока ОЗЗ.

Имеется ещё ряд позитивных проявлений компенсации ёмкостного тока. Всё перечисленное — цель резонансной настройки ДГР с ёмкостью сети. В совокупности это повышает безопасность обслуживания и эксплуатационную надёжность распределительных сетей. Схема, представленная на рис. 1, б, иллюстрирует ситуацию в сети 10 кВ, когда «земли» в ней нет, но наблюдается резонансное состояние при наличии значительного напряжения несимметрии ( $U_{нс} = 100 \text{ В} > 0,75 \% U_{\phi}$ ). Такое возможно, если ДГР изначально настроен с недокомпенсацией (невыполнение п. 5.11.10 [1]).

Если при этом происходит случайное неполнофазное отключение некоторой части электросети, дугогасящий реактор  $L$  входит в состояние бесконтрольного резонанса напряжений с оставшейся ёмкостью сети при значительном увеличении напряжения несимметрии ( $U_{нс} = 100 \text{ В}$ ,  $U_{см} = 10 \text{ кВ}$ ). Бесконтрольный резонанс напряжений вследствие нарушения требований ПТЭ представлен на рис. 2.

В первом случае (возникновение ОЗЗ, см. рис. 1, а) происходит компенсация ёмкостного тока ОЗЗ для чего и устанавливается ДГР (индуктивность  $L$ ). Во втором случае (при вхождении сети в ситуацию бесконтрольного резонанса напряжений, см. рис. 2) так же возникают «перекосы» фазных напряжений и возможно срабатывание предупредительной сигнализации приборов контроля изоляции. Персонал

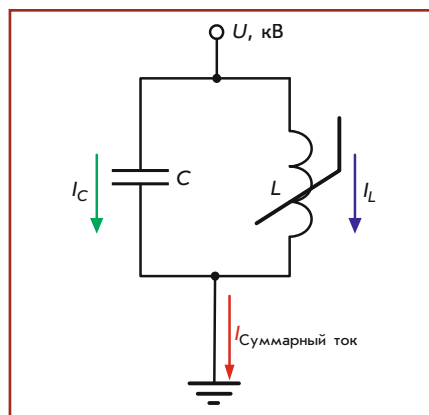


Рис. 3. Фазная ёмкость  $C$  и нелинейная индуктивность  $L$  трансформатора напряжения

это состояние воспринимает как «земля» в сети, что не всегда соответствует действительности, а в нашем примере это неполнофазное отделение части электрической сети.

Реакции на линейные резонансы измерительных приборов и приборов контроля изоляции нередко возникают при вводе в работу «холостых» шин 6 – 35 кВ после подачи на них напряже-

ния. Объясняется это тем, что ТН представляют собой нелинейные индуктивности и при определённых условиях происходит перенасыщение стали магнитопроводов ТН. Взаимодействие нелинейной индуктивности ТН и линейной фазной ёмкости  $C$  ошиновки приводит к феррорезонансу.

Феррорезонанс весьма опасен для обмоток высокого напряжения ТН, поскольку в спектре токов и напряжений появляются высшие гармонические составляющие. Они не суммируются в ноль и как следствие возникает «перекос» фазных напряжений, а в цепях контроля изоляции может появиться сигнал, который интерпретируется как «земля», что не соответствует действительности. В случае возникновения феррорезонанса (кроме того, что это соответственно проявляется в упомянутых показаниях приборов) в ТН появляется нехарактерный гул, вызванный бросками намагничивающего тока, что приводит к повреждению ТН.

Для понимания физических процессов феррорезонанса рассмотрим однофазный вариант взаимодействия ёмкостного тока  $I_C$  и тока нелинейной индуктивности  $I_L$  (рис. 3). Известно, что электрическая ёмкость и индуктивность представляют собой электротехнические антиподы (противоположности):

- вектор ёмкостного тока опережает вектор напряжения на 90 эл. град.;
- вектор индуктивного тока отстает от вектора напряжения также на 90 эл. град.

На рис. 4 показан график взаимодействия эффективных значений  $I_C$  и  $I_L$  относительно напряжения  $U$ . Его анализ показывает, что при подъёме напряжения до определённого уровня индуктивность ТН всегда может перейти в состояние феррорезонанса с ёмкостью «холостых» шин вследствие малого значения ёмкостного тока этих шин.

В связи с этим подачу напряжения на «холостые» шины с подключённым к ним ТН необходимо проводить (по возможности) на минимальном уровне рабочего напряжения. Следует отметить, что увеличение подключённых фазных ёмкостей к ошиновке (включе-

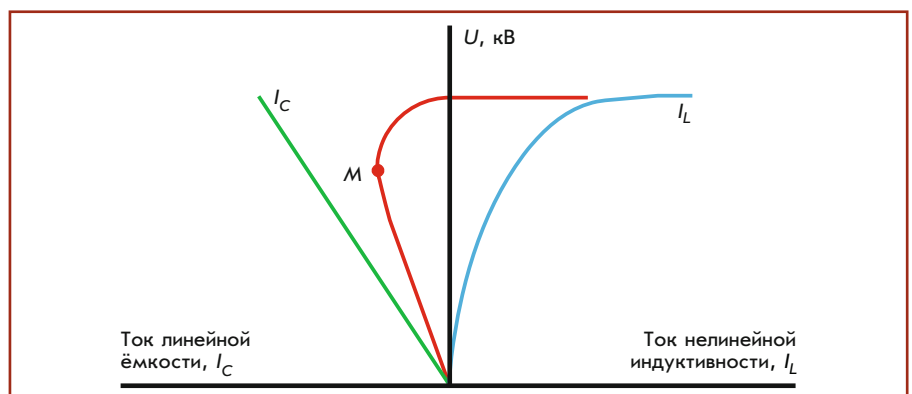


Рис. 4. График взаимодействия эффективных значений  $I_C$  и  $I_L$  относительно напряжения  $U$

ние ВЛ, кабельных линий, участков распределительных сетей и пр.) приводит к росту  $I_C$  и при превышении им определённого значения вообще исключаются феррорезонансные явления.

В частности, в статье [2] приведены границы феррорезонансной устойчивости для схем 6 – 35 кВ. Далее указаны сети различного напряжения ВЛ, расположенные к развитию феррорезонанса, при определённых их длинах: 1 — 28 км (6 кВ); 0,4 — 14 км (10 кВ); 0,038 — 1 км (35 кВ). Данные соотношения получены после того, как в лабораторных условиях были сняты реальные вольт-амперные характеристики трансформаторов НТМИ-6, НТМИ-10 и ЗНОМ-35. На их основании проведён математический анализ в целях определения точки экстремума  $M$  (см. рис. 4), соответствующей точке феррорезонансной неустойчивости («срыва»). Если длины присоединённых линий будут больше (соответственно увеличатся фазные ёмкости и значение  $I_C$ ), феррорезонансные явления в диапазоне рабочих напряжений исключаются.

### Выводы

1. Режим настройки ДГР с недокомпенсацией применяется лишь как временная мера с соблюдением требований п. 5.11.10 ПТЭ.

2. Появление сигнала «земля» в момент подачи напряжения на «холостые» шины не следует интерпретировать однозначно как «земля» в схеме подключаемого оборудования.

3. Подача напряжения на «холостые» шины с подключённым к ним ТН производится по возможности при минимальном напряжении.

4. При появлении признаков феррорезонанса необходимо минимизировать время его существования включением линий потребителей с последующим отключением оборудования для проведения испытаний и разработкой мероприятий по безрезонансному вводу оборудования в эксплуатацию (такой приём успешно применяется на практике).

5. В местных инструкциях для оперативного персонала объектов следует указывать признаки появления феррорезонанса и самостоятельные действия персонала при этом.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. — М.: Энергосервис, 2003.

2. Базанов В. П., Путова Т. Е. О режимах работы трансформаторов напряжения // Электрические станции. 1987. № 2. С. 56 – 58.

## ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЭС

### Классификация систем технического водоснабжения ТЭС

СОРОКИНА Б. А., МАКАРОВА Е. В., канд. техн. наук, ПИЛЬЦОВА Н. К.  
ОАО ВТИ, 115280, Москва, Автозаводская ул., д. 14; sorbella@yandex.ru



Б. А. Сорокина      Е. В. Макарова      Н. К. Пильцова

При учёте общего забираемого из источников объёма воды многократно используемую для охлаждения основного оборудования воду при оборотной системе водоснабжения следует вычитать из общего забираемого объёма. Плата за охлаждающую воду для оборотных систем на порядок меньше. В этом заключаются источник проблем и возможности манипуляций с квалификацией функционирующей системы технического водоснабжения.

**Ключевые слова:** тепловая электростанция, прямоточная система технического водоснабжения, оборотная система технического водоснабжения, водохранилище-охладитель, органы управления водными ресурсами.

Одно из условий эффективной работы тепловой электростанции заключается в необходимости охлаждения основного оборудования (конденсаторов). Количество (объём) воды, требуемое для охлаждения, зависит от количества вырабатываемой энергии.

Если ТЭС расположена вблизи водного объекта (реки), расход воды в котором несоизмеримо выше требуемого для электростанции, то охлаждение осуществляется по схеме, изображённой на рис. 1: вода забирается из реки, проходит теплообменное устройство, снова сбрасывается в реку и уносится потоком дальше по течению. Это прямой ток — прямоточная система охлаждения. И хотя объём воды, используемой для охлаждения, мал по сравнению с объёмом воды в водном объекте, тем не менее, на водный объект в результате сброса нагретой воды оказывается постоянное негативное тепловое воздействие.

Иное дело, когда ТЭС расположена вблизи маловодного объекта, расход в котором не обеспечивает потребности ТЭС круглогодично. В этом случае электростанция вынуждена применять так называемую оборотную систему охлаждения, при которой одна и та же охлаждающая вода «оборачива-

ется», т. е. многократно используется. Процесс представлен схематично на рис. 2. Для охлаждения оборотной воды сооружаются либо градирни, либо брызгальные бассейны, либо водохранилища.

Выбор системы технического водоснабжения (СТВ) для ТЭС происходит на этапе проектирования станции. Подтверждением того, что система водоснабжения на ТЭС, имеющая в качестве охладителя водохранилище, является оборотной, служит утверждённый и прошедший государственную экспертизу проект ТЭС. И так, принципиальное различие двух СТВ: прямоточная предполагает однократное использование всей забранной воды, оборотная однократно использует воду только на компенсацию потерь в системе охлаждения и производственном цикле электростанции. Потери в системе охлаждения связаны с испарением в водохранилище, с продувкой, утечками; потери в производственном цикле — также с испарением, утечками и, кроме того, с невозвратом пара и воды потребителями.

При учёте общего забираемого объёма воды многократно используемую воду для охлаждения основного оборудования при оборотной системе сле-