

ОГРАНИЧЕНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СЕЛЬСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

Турищев Дмитрий Викторович

магистрант, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра 1, РФ, г. Воронеж

Скрипников Роман Петрович

магистрант, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра 1, РФ, г. Воронеж

Пугачев Максим Владимирович

магистрант, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра 1, РФ, г. Воронеж

Григорьев Евгений Александрович

магистрант, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра 1, РФ, г. Воронеж

Королев Александр Иванович

научный руководитель, канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра 1, РФ, г. Воронеж

Феррорезонансные явления в сельских электрических сетях 6-35 кВ связаны с образованием параллельного резонансного контура, включающего нелинейную индуктивность (трансформатор напряжения) и емкость участков линий и шинных мостов.

Возникающие при определенных условиях перенапряжения могут существовать длительное время, и сопряжены, как правило, с высокими значениями токов, разрушающих электрическую изоляцию аппаратов в результате термического воздействия [2].

К *первому типу* развития феррорезонансных колебаний относится случай самовозбуждения колебаний токов и напряжений в электрической сети, содержащей параллельно включенные емкость шин или линии и нелинейную индуктивность трансформатора.

Характеристика намагничивания трансформатора приведена в [3]. Схему замещения можно представить в виде последовательно включенных активного сопротивления обмоток и нелинейной индуктивности.

Активное сопротивление, приведенное к высокой стороне, может составлять величину порядка 2600-3000 Ом.

Нелинейную индуктивность можно рассматривать как линейный элемент с переменными параметрами. Величина индуктивности для рассматриваемой кривой намагничивания изменяется от 100-200 Гн в начальной части характеристики до 5-10 Гн в зоне насыщения.

Емкость параллельной ветви контура зависит от включенного оборудования и длины участков

воздушных линий и может изменяться в широких пределах (от 1 нФ до 10 мкФ) [3,4].

Негативное влияние феррорезонанса заключается не только в увеличении токов фазах, но и в искажении кривых токов и напряжений в связи с возникновением колебаний других частот (высших и субгармонических составляющих) [3].

Условие возникновения феррорезонанса в параллельном контуре на частоте $n\omega$ определяется соотношением:

$$R^2 + (n\omega)^2 L^2 = \frac{L}{C}, \quad (1)$$

где n – кратность гармонической (субгармонической) составляющей.

Рассчитанные по (1) значения емкости оборудования сети, при которых вероятно возникновение феррорезонансных явлений, приведены в таблице 1.

Анализ усложняется тем, что величина индуктивности изменяется с частотой в два раза большей, чем частота приложенного напряжения. Следовательно, при возникновении колебаний напряжения даже небольшой амплитуды с частотой $n\omega$ и изменении параметров с частотой $2n\omega$ в электрической сети могут сложиться условия для длительного существования $n\omega$ -гармонической составляющей тока и напряжения.

Таблица 1.

Параметров условия развития феррорезонанса

Частота гармоники	Емкость сети C, мкФ	
	Начальный участок $L=5 \div 10$ Гн	Зона насыщения $L=100 \div 200$ Гн
1/5 ω	0,612-1,181	2,080-1,190
1/4 ω	0,608-1,150	1,417-0,775
1/3 ω	0,599-1,089	0,840-0,442
1/2 ω	0,575-0,946	0,387-0,198
ω	0,473-0,553	0,099-0,050
2 ω	0,277-0,208	0,025-0,012
3 ω	0,164-0,102	0,011-0,006
4 ω	0,104-0,059	0,006-0,003
5 ω	0,071-0,039	0,004-0,002

Условия существования n -ой гармоники можно представить следующим образом:

- осуществлено глубокое насыщение трансформатора;
- линейная часть схемы настроена в резонанс на частоту меньше $n\omega$, для чего входное

сопротивление схемы должно иметь емкостной характер;

– схема должна иметь малые потери.

Ко второму типу механизма развития феррорезонансных колебаний относится появление его как результат переходного процесса, связанного с какой-либо коммутацией, например, возникновением и исчезновением замыкания фазы линии на землю [2]. При коммутации в сети перенапряжения достигают существенных величин, что приводит к дополнительному насыщению магнитной системы трансформатора и, следовательно, возникновению предпосылок к настройке колебательного контура на одну из частот изменения индуктивности трансформатора. При выполнении условий существования n -ой гармоники в электрической цепи могут возникать и длительно существовать высшие четные и нечетные гармоники, а также некоторые субгармоники. Рассматривался режим возникновения замыкания на землю с последующим его исчезновением в сети 10 кВ. Схема замещения электрической сети приведена на рисунке 1.1. Сопротивление R_2 (2840 Ом) и LN моделируют нелинейный трансформатор напряжения, характеристика намагничивания которого приведена в литературе [13]. Емкость оборудования подстанции и отходящих линий электропередачи учтена в схеме параметром C . Величина C изменялась в указанных выше пределах. Сопротивление R составляет величину порядка 1 Ом. Предполагается возникновение и ликвидация замыкания на землю в одной из фаз. Переменными параметрами являются время погасания дуги T_d и емкость C .

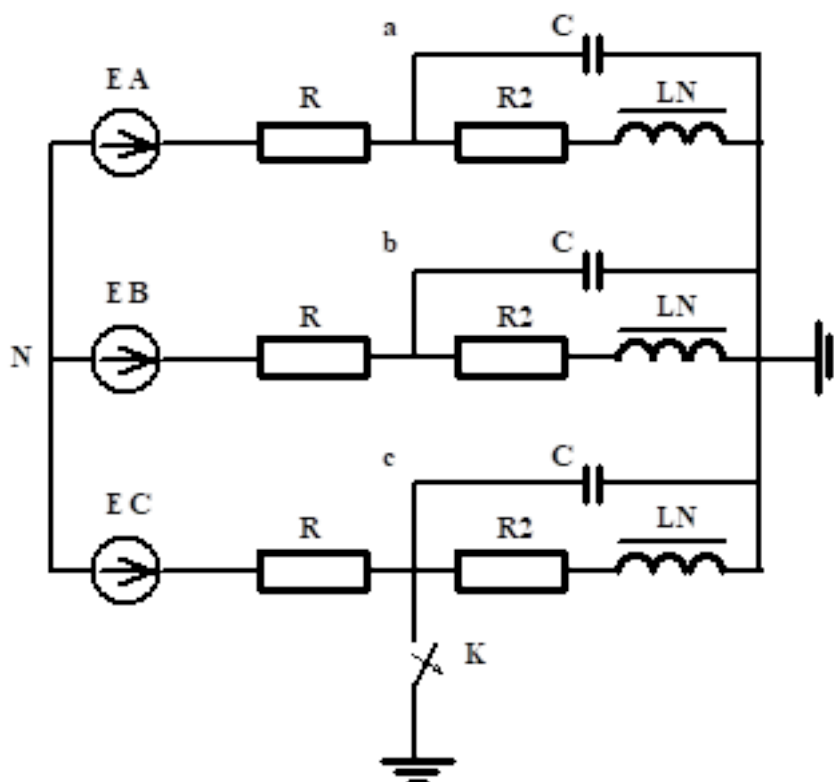
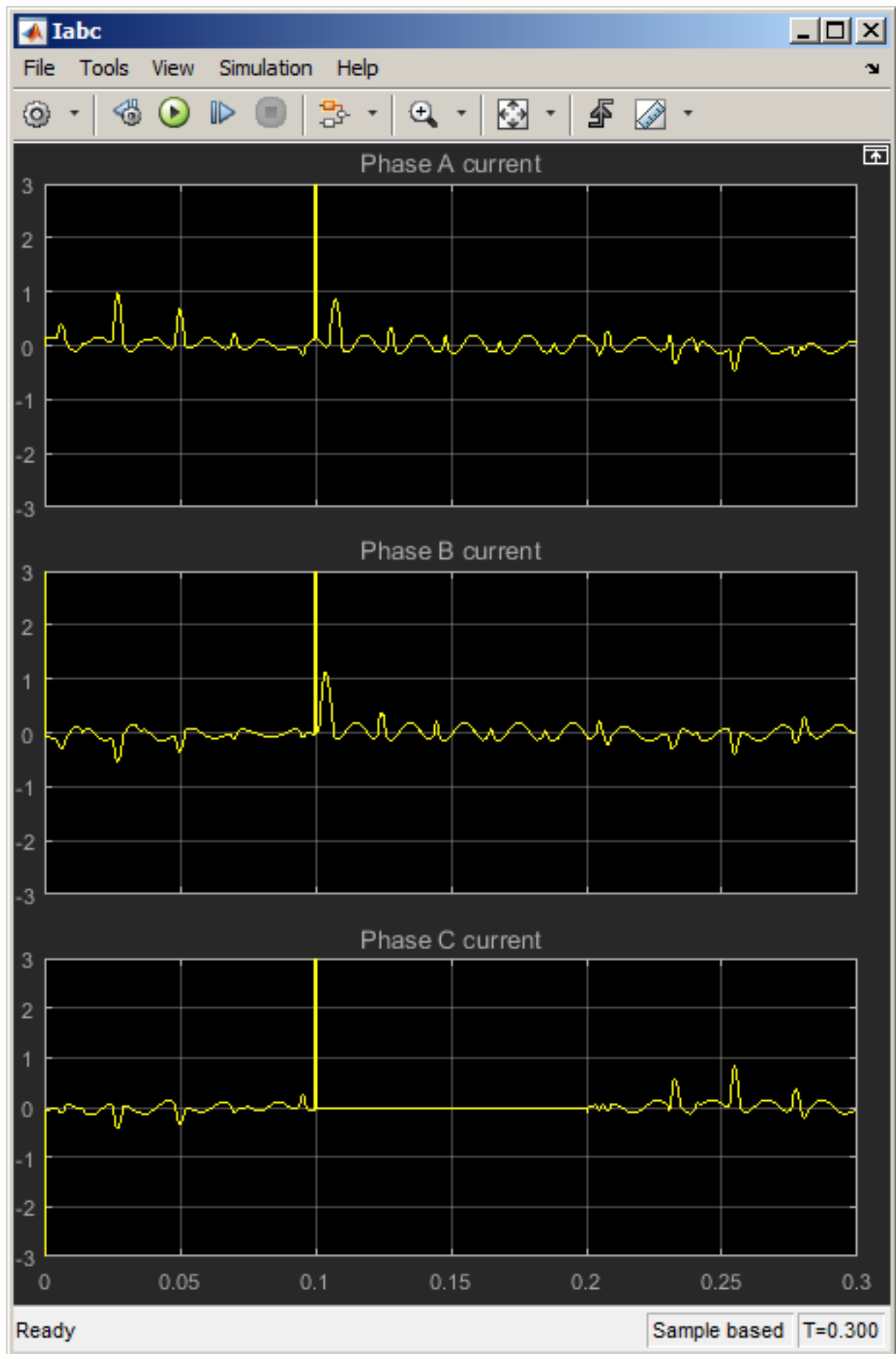
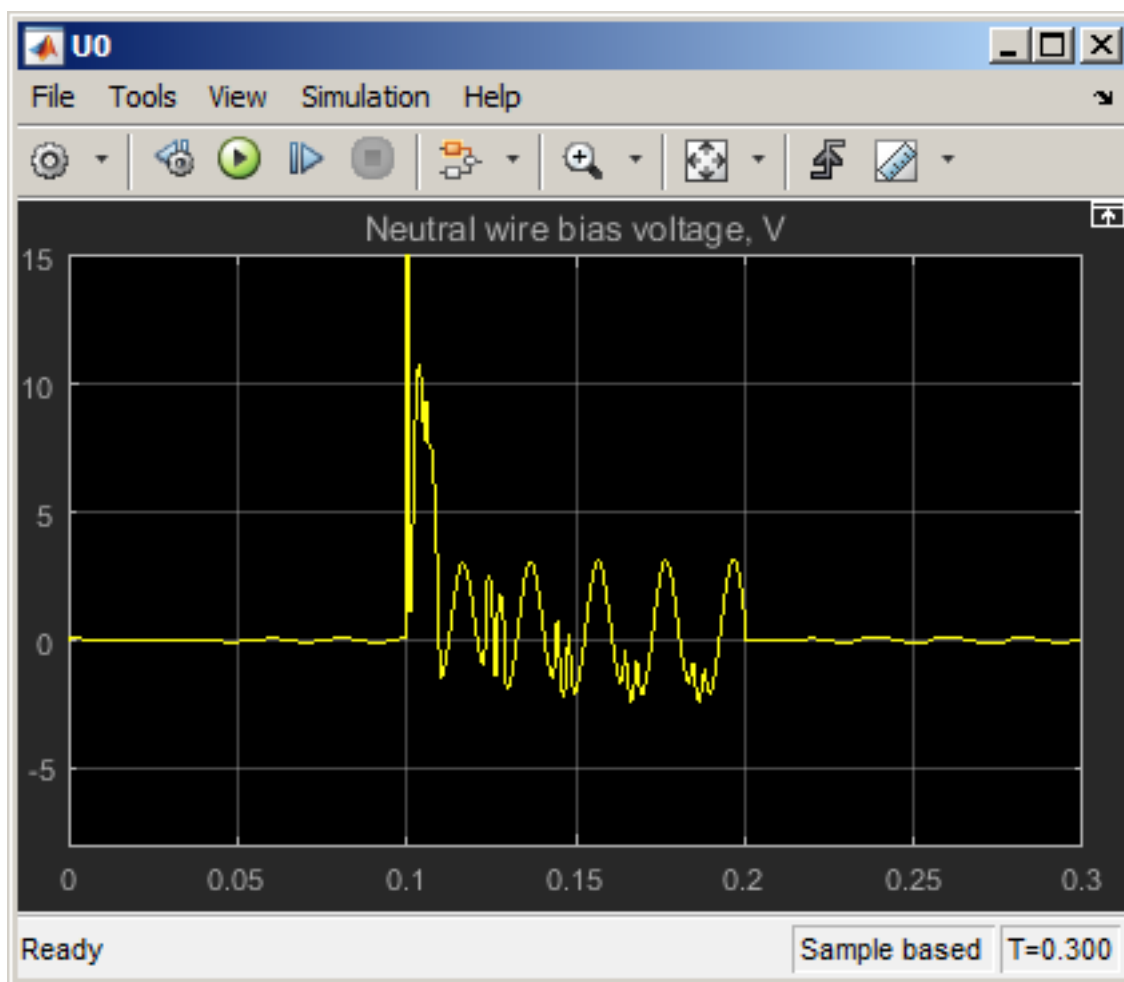


Рисунок 1.1. Схема замещения электрической сети для моделирования феррорезонансных явлений

Результаты одного из экспериментов представлены на рисунке 1.2. Установлено, что условие развития феррорезонанса в сетях с изолированной нейтралью предполагает наличие на одну фазу трансформатора напряжения емкости подстанционного оборудования до 80 нФ.



a)



б)

Рисунок 1.2. Кривые изменения токов в фазах (а) и напряжения смещения нейтрали (б); емкость $C = 0,08$ мкФ; время погасания дуги $T_d = 0,1$ с

В настоящее время защита от феррорезонансных перенапряжений сводится к схемным мероприятиям, позволяющих исключить возможность появления в процессе оперативного переключения электрических схем, предрасположенных к развитию феррорезонансных явлений. Но подобное мероприятие не может исключить ошибки персонала или аварийные ситуации, приводящие к опасным схемам. Более надежным средством подавления феррорезонанса является оснащение трансформаторов напряжения активными сопротивлениями, включенными во вторичные обмотки. Величина активного сопротивления может находиться в пределах от 25 до 6,25 Ом. Но необходимость выполнения переключений во время процесса на вторичной обмотке для изменения величины этого сопротивления является недостатком данного способа. На основании проведенных исследований условий возникновения феррорезонанса и оценки величин перенапряжений и токов, сопровождающих это явление, можно предложить несколько вариантов системы защиты электротехнического оборудования. В качестве основного элемента защитной системы может быть предложен нелинейный ограничитель перенапряжений со стандартными параметрами ОПН-10.

Первый вариант системы ограничения перенапряжения основан на замене вентильных разрядников на ОПН, установленных на шинах подстанции.

Второй вариант системы защиты предполагает заземление нейтрали электрической сети

через ОПН стандартной конструкции. Как следует из результатов расчета, напряжение на нейтрали сети снижается по сравнению с напряжением в сети без ОПН, а на фазах – приблизилось к симметричному режиму. Однако действие ОПН нельзя признать удовлетворительным, т.е. такая система защиты требует дальнейшего совершенствования за счет использования в нейтрали ОПН с глубоким уровнем ограничения перенапряжений.

Третий вариант системы ограничения перенапряжений предполагает установку ОПН в разомкнутый треугольник вторичной обмотки трансформатора напряжения. По эффективности эта мера подобна варианту с ОПН на шинах подстанции, но имеет ряд преимуществ:

- позволяет снизить количество ОПН с трех на каждой секции шин, имеющих трансформатор напряжения, до одного аппарата, установленного в треугольник трансформатора напряжения;
- позволяет получить существенную экономию за счет более дешевого ОПН, выполненного на низкий класс напряжения.

Окончательный выбор одной из систем защиты может быть проведен после дополнительного исследования условий эксплуатации ОПН в этих схемах и сравнительного технико-экономического анализа вариантов [5].

Список литературы:

1. Картавец В.В. Внутренние перенапряжения в сельских электрических сетях и система их ограничения / В.В. Картавец, Д.Н. Афоничев // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2019, № 1. – С. 128-134.
2. Картавец В.В. Исследование феррорезонансных перенапряжений в распределительных электрических сетях / В.В. Картавец, С.Н. Пиляев, С.А. Канюс // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы международной научно-практической конференции. – Воронеж: ВГАУ, 2020. – С. 47-54.
3. Картавец В.В. Разработка системы ограничений феррорезонансных перенапряжений в электрических сетях / В.В. Картавец, В.Б. Фурсов, Е.С. Цеджинов // Электромеханические устройства и системы. Межвузовский сборник научных трудов. – Воронеж: ВГТУ, 1996. – С. 98-103.
4. Киреева Э.А. Феррорезонанс и ограничение его влияния на надёжность и долговечность работы систем электроснабжения. // «Электрооборудование: эксплуатация и ремонт». Научно-практический журнал, 2012, № 9. с. 22 -32.
5. Колечицкая Н.А. Феррорезонансные явления на шинах подстанций 6-10 кв. / Н.А. Колечицкая, Н.С. Лазарев, Р.Н. Шульга, К.А. Змиева // Электротехника. 2013. № 4. С. 2-8.