УДК 621.316.94: 621.316.933.9

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ РЕЗИСТОРА ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ФЕРРОРЕЗОНАНСА**

**Рыжкова Е.Н., Л. Аарон В. В,**

*Россия, г. Москва, НИУ* *«МЭИ»*

*Аннотация. Рассмотрены случаи возбуждения феррорезонанса в сетях средних классов напряжения и обосновано условие выбора величины резистора в нейтрали для подавления этого нежелательного явления.*

*Ключевые слова: нелинейные индуктивности, резистор, волновое сопротивление, феррорезонанс.*

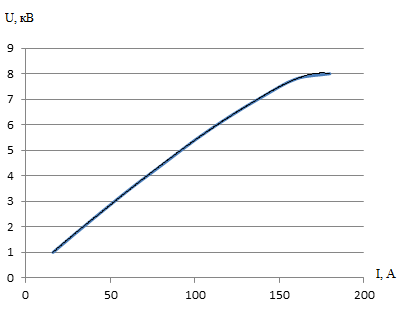
*Abstract. Cases of ferroresonance appearing in medium-voltage networks are considered and justified  the conditions to select the value of the neutral grounding resistor to suppress this undesirable phenomenon.*

*Keywords: nonlinear inductance, resistor, characteristic impedance, ferroresonance.*

Под нелинейным индуктивным сопротивлением понимают катушку индуктивности, намотанную на замкнутом сердечнике из ферромагнитного материала. В силу нелинейной зависимости между магнитной индукцией и напряженностью поля в ферромагнитном материале индуктивное сопротивление такой катушки, оказываемое прохождению переменного тока, не постоянно, оно зависит от величины тока.

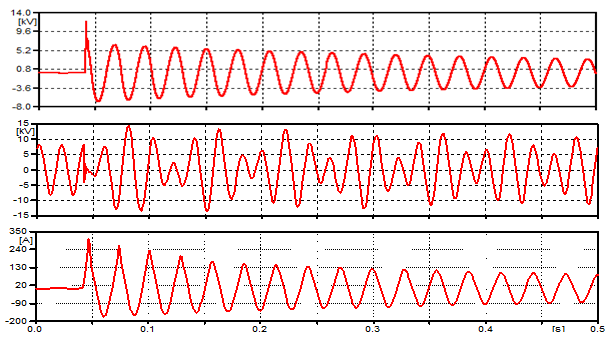
Очевидно, что и дугогасящие реакторы (ДГР) подходят под это определение, так в [1] приводятся типовые зависимости токов ответвлений от напряжения для ступенчато регулируемых ДГР, что явно характеризует их как чисто нелинейные индуктивности. Кроме того, в [2] показано, что дугогасящий аппарат при определенных условиях может переходить в режим насыщения стали магнитопровода. Наличие насыщающейся индуктивности в совокупности с емкостью сети создает условия для возникновения феррорезонансных процессов (ФПП). Например, в [3] показано, что насыщение ДГР играло важную роль в возбуждении ФПП в сети после исчезновения однофазного замыкания на землю (ОЗЗ). Большинство сетей в России оснащены в основном ступенчатыми ДГР с ручным переключением ответвлений типа ЗРОМ или РЗДСОМ [4], при работе которых в сети низкими расстройками возникновение ФПП при ОЗЗ маловероятно, но когда возникают большие расстройки, возможно возникновение биений фазных напряжений, что, в свою очередь, может привести к насыщению реактора.

Для ДГР типа ЗРОМ, характеристика намагничивания которого приведена на рисунке 1, были проведены расчеты переходных процессов при значительных расстройках компенсации, когда после ликвидации однофазного замыкания в сети 10 кВ возбуждался феррорезонанс.



***Рисунок 1.- Характеристика  для ДГР ЗРОМ-600/10***

Результаты расчетов показаны на рисунке 2.



***Рисунок 2. Возникновение ФПП в результате насыщения реактора при ОЗЗ***

В [5] предлагается выбор величины резистора для ограничения дуговых перенапряжений с помощью соотношения:

, (1)

где  - ток расстройки.

Такое сопротивление в нейтрали приводит к прекращению биений напряжений на фазах после погасания дуги, считается также, что оно достаточно и для подавления феррорезонанса.

Хотя это правильный подход, при развитии сети, эксплуатационных изменениях емкости сети резистор фиксированной величины малоэффективен как для ограничения дуговых, так и феррорезонансных перенапряжений.

Известно условие предотвращения феррорезонанса для колебательного контура за счет включения резистора, равного волновому сопротивлению:

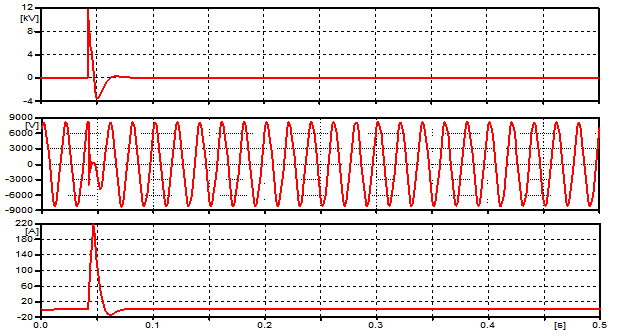
, (2)

где L- индуктивность реактора;

С- емкость сети при заданной расстройке.

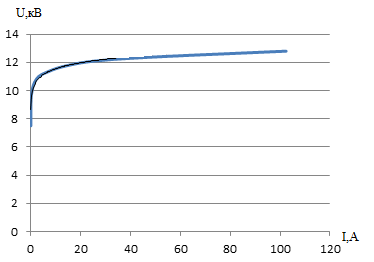
Таким образом можно определить пределы регулирования величины управляемого резистора в нейтрали для всех возможных эксплуатационных режимов, при которых будут устранятся и биения, и возможность возникновения ФПП.

Результаты расчета переходного процесса при включении резистора, величина которого выбрана по условию (2) для степени расстройки компенсации +0,5 (недокомпенсация) показаны на рисунке 3.



***Рисунок 3. Подавление ФПП при включении резистора***

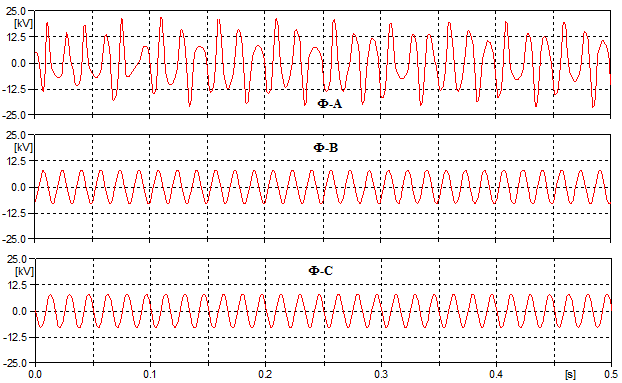
Был рассмотрен также феррорезонансный процесс при двухфазном включении трансформатора 10/0,4 кВ со схемой соединения обмоток Δ/Y-0, характеристика намагничивания которого представлена на рисунке 2, при обрыве фазы А в сети с изолированной нейтралью при емкостном токе Iс = 18 А (3.403 µф).



***Рисунок 4.- Характеристика трансформатора***

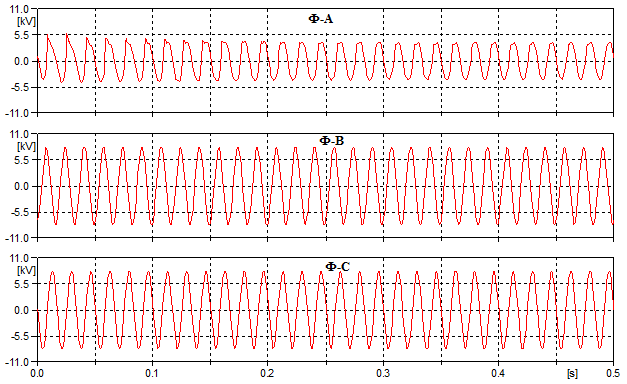
На рисунке 5 показан переходный процесс при двухфазном включении трансформатора. В фазе А возникает ФПП на стороне высшего напряжения. Напряжения на других фазах остаются неизменными.

Расчетами по условию (2) получено, что в данном случае необходимо включение резистора с сопротивлением 750-1000 Ом, который эффективно ограничивает ФПП.



***Рисунок 5. - Феррорезонансный процесс при двухфазном включении трансформатора 10/0,4 кВ***

При включении резистора на фазе, где произошел обрыв фазы, напряжение будет не больше половины линейного напряжения [6]. На рисунке 6 показано, что незначительные искажения напряжения присутствуют, что соответствует результатам других авторов [7] при включении заземляющего резистора для подавления ФПП.



***Рисунок 6. - Подавление феррорезонансного процесса при включении резистора***

***750 Ом***

Таким образом, на основании моделирования показано, что подключение регулируемого резистора, выбранного по величине волнового сопротивления, позволяет превратить хаотичные колебания, характерные для феррорезонансных процессов, в периодические колебания промышленной частоты и ограничить феррорезонанасные перенапряжения на допустимом для изоляции уровне.

Список литературы

1. Инструкция по выбору, установке и эксплуатации дугогасящих катушек [Текст]. – М.: Энергия, 1971, - 104 с.

2. Лихачев, Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и компенсацией емкостных токов [Текст] / Ф.А. Лихачев - М.: Энергия, 1971. – 152 с.

3. Титенков, С.С. Режимы заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ и организация релейной защиты от однофазных замыканий на землю [Текст] / С.С. Титенков, А.А. Пугачев. – Энергоэксперт. – 2010. – №2. – 8 с.

4. Arieh, L. Shenkman.Transient analysis of electric power circuits handbook [Text] / L. Arieh. – Israel.: Springer. – 2005. – 575 c.

5. Евдокунин, Г.А. Внутренние перенапряжения в сетях 6-35кВ [Текст] / Г.А. Евдокунин, С.С. Титенков. – СПб: Из-во Терция, 2004. – 188 с.

6. Norouzi, А. Open phase conditions in transformers analysis and protection algorithm [Тext] /A. Norouzi. – Markham, Canada: GE digital energy, 2013. – 14 р.

7. Radmanesh, H. Analyzing Ferroresonance Phenomena in Power Transformers Including Zinc Oxide Arrester and Neutral Resistance Effect [Тext] / H. Radmanesh, F.S. Hamid. – Iran: Hindawi publishing corporation, 2012.

**Рыжкова Елена Николаевна**, д-р техн. наук, профессор НИУ «МЭИ»,

почтовый адрес: 140250, Московская обл. Воскресенский р-н, д. Цибино, пер. Школьный д. 11, кв. 12

e-mail: RyzhkovaYN@mpei.ru

**Луис Аарон Вергара Варгес**, аспирант НИУ «МЭИ»,

почтовый адрес: 111020, Москва, ул. 1-ая Синичкина,  д. 3, к. 1

e-mail: [mordenx@hotmail.com](mailto:mordenx@hotmail.com), т. +7 926 836 53 99