

А.И. Федотов, Г.В. Вагапов, Н.В. Чернова  
(г. Казань, Казанский государственный энергетический университет)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДУШНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ**

*Приведены результаты имитационного моделирования распределительной сети 10 кВ. Показано, что при однофазных замыканиях на землю устойчивым признаком наличия повреждения на фидере в виде перемежающейся дуги является состав высших гармоник.*

*The results of simulation modeling of a 10 kV distribution network are presented. It is shown that with single-phase earth closures, a stable sign of the presence of damage on the feeder in the form of an intermittent arc is the composition of higher harmonics.*

*Ключевые слова: однофазные замыкания на землю, частотные характеристики воздушных линий, резонансные гармоники тока и напряжения, место повреждения, электрические сети.*

*Keywords: single-phase earth fault, frequency characteristics of overhead lines, resonant harmonics of current and voltage, fault location, electrical networks.*

По данным эксплуатирующих организаций и литературных источников, преобладающим видом повреждений в воздушных распределительных электрических сетях напряжением 6 – 35 кВ являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ). При появлении ОЗЗ необходимо его распознать и определить расстояние до места повреждения, а при невозможности определения точки ООЗ – локализовать участок воздушной линии (ВЛ) с повреждением. Существуют различные подходы к решению данной задачи [1-3], но до сих пор не найден достаточно эффективный способ идентификации места замыкания. Объясняется это широким разнообразием аварийных режимных параметров сети в случае возникновения повреждения, которые могут послужить источником информации по установлению удаленности ОЗЗ от центра питания (ЦП). В связи с этим представляется маловероятным существование единого универсального способа установления собственно факта повреждения и определения расстояния до места повреждения, работоспособного во всех возможных случаях. Складывается ситуация, аналогичная давно пройденному этапу в релейной защите, где для одного объекта (генератор, трансформатор, ВЛ и т.д.) выполняется несколько видов защит, основанных на выделении разных признаков аварийного события. Есть вполне устойчивый признак ОЗЗ, который принципиально зависит от удаленности ОЗЗ и может быть выделен на базе штатных измерительных

устройств подстанции, – это «резонансные» частоты линии электропередачи [1-3], на которых происходит резкое увеличение напряжения высших гармоник (ВГ) на конце ВЛ и тока в начале соответствующей линии. Перемежающаяся дуга является генератором широкого спектра ВГ тока и напряжения, тем самым обуславливается возможность усиления отдельных гармоник и соотношения с местом подключения их источника [2].

Идентификация резонансных ВГ напряжения возможна как на шинах ЦП по напряжению нулевой последовательности, так и на шинах 0,4 кВ понижающих подстанций, но уже только по напряжениям прямой и обратной последовательностей [1]. В результате можно построить достаточно простую систему определения места повреждения, если иметь информацию по качеству электроэнергии с подстанций 10/0,4 кВ и ограничиться идентификацией поврежденного участка. Рассмотрим в качестве примера схему фидера древовидной структуры (рис. 1). На рис. 2 представлена имитационная модель фидера, собранная в среде RSCAD.

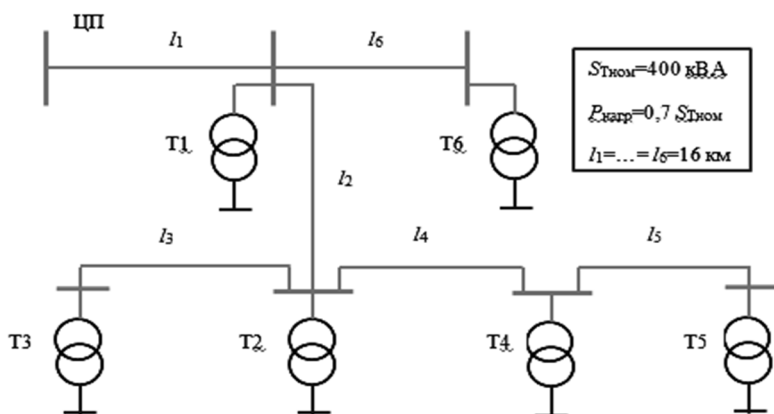


Рис. 1. Принципиальная схема фидера

В схеме (рис. 2) ОЗЗ воспроизводится ключом, замыкающим фазу «а» один раз за каждый полупериод промышленной частоты на землю. Место замыкания принималось последовательно на стороне высшего напряжения каждого из трансформаторов. Измерения напряжения проводились на стороне 0,4 кВ каждого трансформатора с последующим подавлением основной гармоники и определением спектрального состава напряжения. На рис. 3 в качестве примера представлен спектральный состав напряжений на стороне 0,4 кВ для трансформаторов Т1 (рис. 3а) и Т2 (рис. 3б) при ОЗЗ на стороне высшего напряжения трансформатора Т2 (рис. 1). По оси ординат напряжение приведено в киловольтах. На ближайшей к месту повреждения подстанции напряжение «резонансной» гармоники выше (рис. 3).

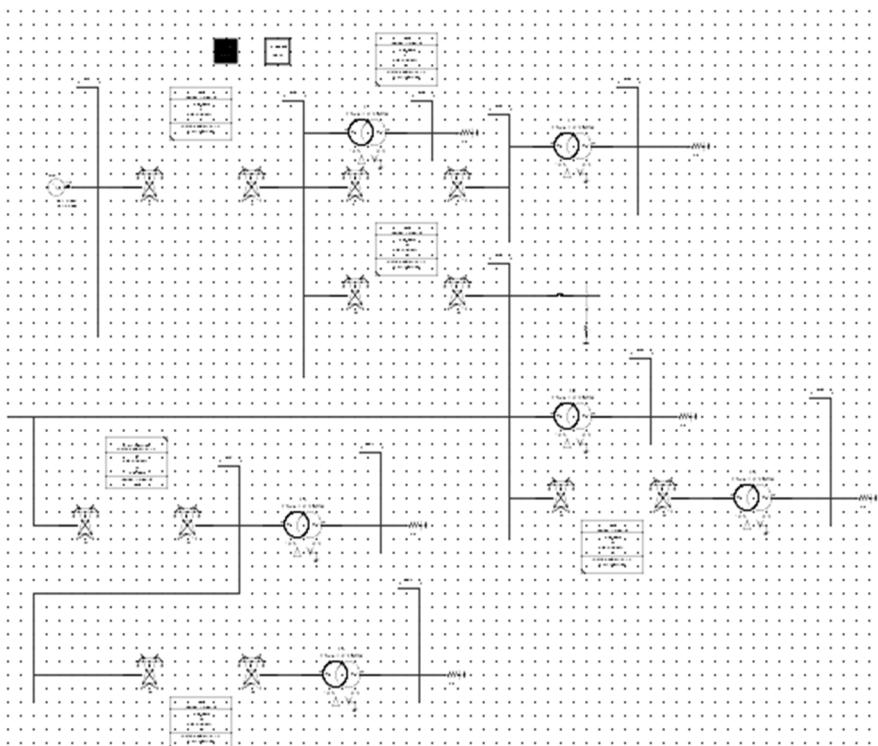
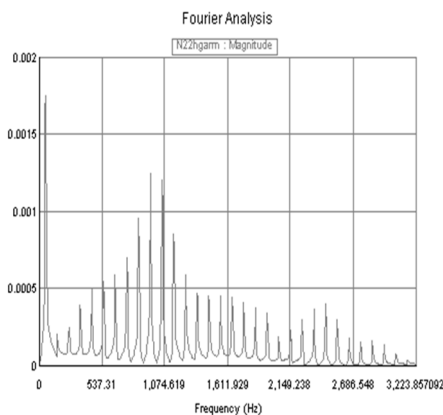
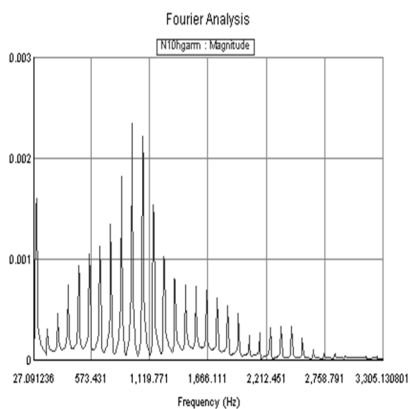


Рис. 2. Имитационная модель фидера в среде RSCAD



а)



б)

Рис. 3. Спектральный состав напряжений на стороне 0,4 кВ

Анализ полученных закономерностей изменения напряжения резонансных гармоник по подстанциям в зависимости от места замыкания показал следующее. Во-первых, резонансные гармоники отчетливо проявляются на стороне 0,4 кВ трансформаторных подстанций. Во-вторых, частота резонансной гармоники зависит от удаленности замыкания: чем ближе к ЦП источник ВГ, тем выше резонансная частота. Таким образом, значение частоты служит маркером удаленности ОЗЗ. Модельные эксперименты показали, что увеличение активного контактного сопротивления в месте замыкания сохраняет значение резонансной частоты (950 Гц), но снижает уровень напряжений ВГ на всех подстанциях. Так, при переходном сопротивлении 200 Ом напряжение резонансной гармоники на стороне 0,4 кВ трансформатора Т2 снизилось с 2,33 до 0,55 В. В-третьих, путем сравнения уровня напряжений резонансных гармоник на стороне 0,4 кВ трансформаторных подстанций можно установить поврежденный участок фидера между двумя соседними подстанциями.

Прежде чем ставить задачу поиска места повреждения при ОЗЗ, необходимо определиться с фидером, на котором произошло повреждение. Эта задача, несмотря на кажущуюся простоту, осложняется малыми величинами токов ОЗЗ для воздушных линий. Опыт эксплуатации показывает, что достаточно часто искомый фидер не устанавливается действующими устройствами релейной защиты, а в некоторых случаях и сам факт ОЗЗ ими не выявляется. Натурный эксперимент в действующих электрических сетях при ОЗЗ через ствол дерева показал, что штатная система релейной защиты не почувствовала аварийной ситуации, напряжение нулевой последовательности на шинах ЦП составило 11 В. В то же время в этом напряжении проявились ВГ (рис. 4) изначально отсутствовавшие.

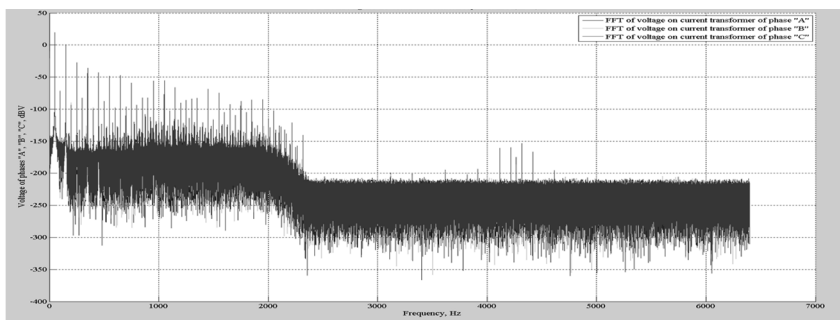
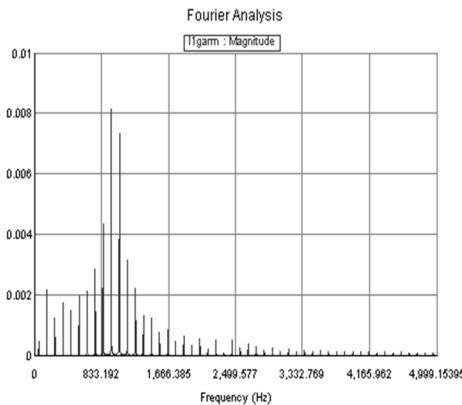
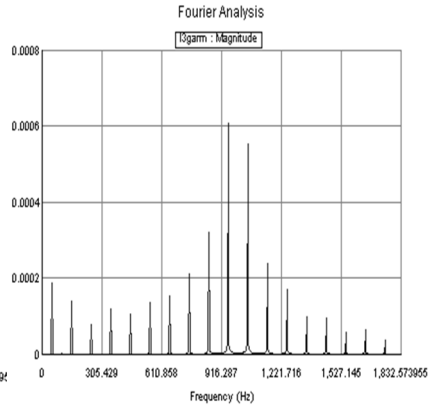


Рис. 4. Спектр напряжения в логарифмическом масштабе

В среде RSCAD были выполнены расчеты режима ОЗЗ при переходном сопротивлении в месте ОЗЗ равном 100 Ом для случая пяти отходящих линий. На рис. 5 представлены спектры токов, «очищенные» от



а)



б)

Рис. 5. Спектральный состав токов в воздушных линиях

первой гармоники, при воспроизведении ОЗЗ на первой линии (рис. 5а) для неповрежденных линий токи ВГ на порядок ниже (рис. 5б).

Вариации нагрузок на подстанциях, увеличение переходного сопротивления, изменение длин линий показали устойчивость идентификации ОЗЗ на фидере по наибольшему значению резонансной гармоники.

При наличии в токах высших гармоник, обусловленных нагрузкой и элементами электрической сети, использования совокупности нескольких резонансных гармоник позволяет надежно отстроиться от шума и обеспечить надлежащую селективность.

### Список литературы

1. Федотов, А.И. Определение мест обрыва и однофазных замыканий на землю в распределительных электрических сетях по параметрам режима на стороне 0,4 кВ понижающих подстанций / А.И. Федотов, Г.В. Вагапов, Н.В. Роженцова, Р.Э. Абдуллазянов // Промышленная энергетика. – 2016. – №4. – С. 34-40.
2. Fedotov, A. Detection of places of single-phase ground fault by frequency of the resonance / A. Fedotov, R. Abdullazyanov, G. Vagapov, L. Grackova // 57<sup>th</sup> International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering (RTUCON-2016) of Riga Technical University 13-14 October. – Riga. – P. 214-219.
3. Fedotov, A. Location of single-phase ground fault by positive, negative and zero sequence of overhead power lines in ungrounded power grids of 6-10-35 kV level voltage / A. Fedotov, G. Vagapov, N. Chernova // Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering «ELEKTROENERGETIKA 2017» 12–14 September, 2017, Stará Lesná, Slovak Republic. - Technical University of Košice, 2017. – P. 384-388.

Материал поступил в редколлегию 02.10.18.