



УДК 621.311

УСЛОВИЯ РАБОТЫ И СЕЛЕКТИВНОСТЬ РЕЛЕЙНЫХ ЗАЩИТ ОТ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ 6–35 кВ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ© А.С. Афанасенко¹

Иркутский государственный технический университет,
664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Рассмотрены способы заземления нейтралей в сетях с изолированной нейтралью и их влияние на величину тока однофазного замыкания на землю; условия появления высокочастотных гармоник в токе однофазного замыкания на землю и перенапряжений на неповрежденных фазах сети; зависимость перенапряжений от параметров сети; влияние способов заземления нейтралей на надежное и селективное срабатывание релейной защиты при однофазном замыкании на землю.

Библиогр. 11 назв.

Ключевые слова: заземление нейтрали в сетях 6–35 кВ; ток однофазного замыкания на землю; релейная защита от однофазного замыкания на землю; перенапряжения в сетях 6–35 кВ.

WORKING CONDITIONS AND SELECTIVITY OF RELAY PROTECTION AGAINST SINGLE LINE-TO-EARTH FAULTS IN 6-35 kV NETWORKS WITH INSULATED NEUTRAL

A.S. Afanasenko

Irkutsk State Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia.

The article treats the methods of neutral grounding in the networks with an isolated neutral and their effect on the value of single line-to-earth fault current. It considers the conditions of high-frequency harmonics occurrence in the single line-to-earth fault current and surges on the fault-free network phases, surge dependence on network parameters, the influence of neutral grounding methods on reliable and selective tripping of relay protection under a single line-to-earth fault. 11 sources.

Key words: neutral grounding in 6-35 kV networks; single line-to-earth fault current; relay protection against single line-to-earth fault current; surge in 6-35 kV networks.

В распределительных сетях с рабочим напряжением 6–35 кВ ключевой проблемой является режим заземления нейтрали, оказывающий решающее влияние на надежность электроснабжения потребителей, сохранность электрических машин и силовых кабелей, безопасность людей и животных, оказавшихся в местах проходов линий, а также на выбор принципов и типов устройств релейной защиты и автоматики (РЗА), на способы использования этих устройств для отключения, сигнализации однофазных замыканий на землю (ОЗЗ).

ОЗЗ в сетях 6–35 кВ составляют 75–90% от общего числа повреждений. Ток ОЗЗ зависит от рабочего напряжения сети, суммарной емкости неповрежденных фаз сети по отношению к земле, сечения жил кабеля. Величина тока ОЗЗ соизмерима с током нагрузки и может изменяться от единиц до сотен ампер. При этом вся электрически связанная сеть длительно подвергается перенапряжениям, сопровождающимся перемежающейся электрической дугой в месте повреждения [5].

Теоретически при «металлическом» ОЗЗ перенапряжения на неповрежденных фазах равны 1,73 фазных напряжений (U_{ϕ}) [11].

Время работы сети с ОЗЗ ограничивается термической стойкостью измерительных трансформаторов напряжения (ТН), у которых нейтраль первичной об-

мотки глухо заземлена [11].

В России главным образом используются следующие режимы [7]:

- изолированная нейтраль;
- резонансно-заземленная нейтраль;
- с заземлением нейтрали через активное сопротивление (резистор), которое внесено в нормативные документы.

На основе известных методов и существующих устройств релейной защиты от ОЗЗ в сетях 6–35 кВ, обладающих во всех случаях 100% селективностью и требуемой чувствительностью, получить эти характеристики не удастся, что требует дополнительных дальнейших обсуждений.

Реально амплитуды дуговых перенапряжений достигают 3,5–3,8 U_{ϕ} , сопровождаются пробоем изоляции неповрежденных фаз с переходом в междуфазное короткое замыкание (КЗ) через землю, после отключения которого релейной защитой от междуфазных КЗ режим ОЗЗ продолжается. Перемежающаяся дуга в месте ОЗЗ сопровождается перенапряжениями на неповрежденных фазах сети.

Положение осложняется феррорезонансными явлениями в сети, приводящими к повреждениям трансформаторов напряжения и маломощных силовых трансформаторов.

При ОЗЗ на железобетонных опорах ВЛ-6 (10–35)

¹Афанасенко Александр Семенович, аспирант, тел.: (3952) 405127.
Afanasenko Alexander, Postgraduate, tel.: (3952) 405127.



кВ разрушается бетон опоры по границе с грунтом, возникают шаговые напряжения, наблюдаются падения опор [10].

В проводных линиях связи при ОЗЗ возникают большие электромагнитные помехи.

Как правило, ОЗЗ сопровождаются в месте повреждения электрической дугой, являющейся источником пожаров лесных массивов, торфяников. В кабельных сооружениях энергетических объектов при двойных замыканиях на землю с повреждениями оболочек кабелей возникают пожары, наносящие большой ущерб производственным объектам, объектам энергетики [4].

Переменяющая дуга в месте ОЗЗ при токе в дуге до 10 А создает перенапряжения порядка 3,5–3,8 U_{ϕ} сети. При токах дуги больше 10 А создает перенапряжения порядка 3 U_{ϕ} сети, при токе 20–50 А перенапряжения держатся на уровне 2,7 U_{ϕ} . Снижение перенапряжений при ОЗЗ с увеличением тока в дуге объясняется ее устойчивым горением.

Максимум перенапряжения при ОЗЗ возникает в следующих ситуациях:

- при наличии напряжения на поврежденной фазе в момент первичного зажигания дуги;
- в момент погасания дуги и при напряжении повторного ее зажигания (вторичный пробой) в течение этого же полупериода напряжения [5].

Вторичный пробой происходит при ненулевом значении напряжения в нейтрали сети, которое зависит от условий гашения дуги после первого пробоя и имеет значение 0,5–1,4 U_{ϕ} сети.

Максимум перенапряжения 3,8 U_{ϕ} сети при ОЗЗ достигается, если дуга гаснет при переходе через нулевое значение свободной составляющей тока дуги. Быстрое гашение дуги приводит к зарядке емкостей неповрежденных фаз до напряжения, превышающего U_{ϕ} , чем обуславливается появление напряжения на нейтрали и последующий пробой (зажигание дуги) в момент максимума напряжения поврежденной фазы, а также к нарастанию напряжения на нейтрали и к перенапряжению на неповрежденных фазах сети [3].

Недостатки сети с изолированной нейтралью частично компенсируются заземлением нейтрали через активное сопротивление (резистор), что позволяет снизить перенапряжения, исключить явление феррорезонанса, улучшить условия срабатывания релейной защиты [2].

Применяются возможные режимы заземления нейтрали сетей 6–35 кВ:

- изолированная нейтраль;
- заземление нейтрали через дугогасительный реактор (ДГР);
- заземление нейтрали через резистор;
- заземление нейтрали через ДГР, зашунтированный резистором.

Заземление нейтрали через дугогасительный реактор (ДГР) позволяет полностью компенсировать емкостные токи в месте ОЗЗ и ограничить величину дуговых перенапряжений [8]. Это положительное качество имеет и негативную сторону, проявляющуюся при неточной настройке ДГР, что способствует возникновению больших кратностей перенапряжений при

ОЗЗ в сочетании с неполнофазным режимом, возникающим из-за одновременного отключения фаз выключателя или отказа одного из полюсов выключателя.

Резонансная настройка нейтрали сети в процессе ОЗЗ и погасания дуги в некоторых случаях приводит к повторным пробоям при напряжении, равном или меньше фазного, а на неповрежденных фазах перенапряжения могут достигать 2,4 U_{ϕ} . При расстройке компенсации от 15 до 30% дуговые перенапряжения достигают 2,8–3 U_{ϕ} сети, что снижает эффективность заземления нейтрали через ДГР. При резонансной настройке нейтрали сети токовая защита от ОЗЗ отключается [8].

При неточной настройке ДГР процесс выравнивания напряжений фаз после погасания дуги носит характер биений. Частота биений определяется степенью расстройки компенсации и добротностью образованного колебательного контура [11].

При точной настройке ДГР или настройке с незначительной перекомпенсацией возникновение ОЗЗ неизбежно приводит к расстройке ДГР, а возникновению биений способствует отключение от сети присоединения с большим емкостным током. Биения могут привести к повторному ОЗЗ, которое произойдет при напряжении, близком к максимуму, что станет причиной перенапряжений на неповрежденных фазах сети [11].

Однако в неповрежденных фазах сети протекают преимущественно емкостные токи, токи утечки, в которых присутствуют гармоники высших порядков по отношению к основной частоте сети. Выделение этих токов, изучение условий их возникновения и растекания, возможно, позволит в перспективе обеспечивать селективные отключения ОЗЗ в сетях 6–35 кВ [4].

Для достижения селективных срабатываний релейной защиты (РЗ) уставка срабатывания защиты отстраивается от емкостного тока защищаемого присоединения при условии, что ток срабатывания защиты меньше тока ОЗЗ всей сети. Поэтому сети с ДГР предпочтительно эксплуатируются с перекомпенсацией емкостного тока ОЗЗ [8].

Заземление нейтрали сети через высокоомный или низкоомный резистор дает ряд положительных качеств.

Заземление через высокоомный резистор нейтрали сети выполняется с целью ограничения дуговых перенапряжений и исключения феррорезонансных явлений при ограниченно допустимом времени работы сети с ОЗЗ при отыскании поврежденного участка сети дежурным персоналом.

Высокоомный резистор, установленный в нейтрали, позволяет уменьшить постоянную времени разряда емкости неповрежденных фаз сети во время безтоковой паузы. Время полного разряда емкостей фаз – 0,008–0,010 секунды. Расчетная величина сопротивления резистора должна обеспечивать ток при ОЗЗ больше тока срабатывания РЗ [2].

Низкоомный резистор в нейтрали сети обеспечивает срабатывание релейной защиты при ОЗЗ и максимальную зону защиты обмоток генераторов, транс-



форматоров, электродвигателей, способствует подавлению феррорезонанса и ограничению перенапряжений на неповрежденных фазах сети. Заземление нейтрали через низкоомный резистор эффективно для сетей с синхронными генераторами и вращающимися машинами. Резистор в этом случае создает условия, предотвращающие недопустимые перенапряжения в неповрежденных фазах сети с емкостным током не менее тока ОЗЗ, обеспечивает селективное отключение поврежденного присоединения при срабатывании РЗ от ОЗЗ.

Расчетная величина резистора из рассмотренных условий выбирается минимальной [2].

Шунтирование резистором ДГР позволяет устранить биения после погашения дуги, ограничить перенапряжения при повторных пробоях до $2,4 U_{\phi}$ сети. Шунтирующий резистор позволяет:

- ограничить перенапряжение на неповрежденных фазах сети при ОЗЗ до величины профилактического испытательного напряжения обмоток вращающихся электрических машин переменного тока в соответствии с «Объемами и нормами испытания электрооборудования» [9];

- увеличить активную составляющую в токе ОЗЗ и тем самым обеспечить селективность токовых защит, исключить феррорезонансные процессы.

Расчетная величина шунтирующего резистора должна обеспечивать максимальное значение перенапряжения на неповрежденных фазах сети при ОЗЗ не более $2,6 U_{\phi}$ сети [9].

Режим заземления нейтрали в сети 6 (10–35) кВ выбирается по одному из важных признаков:

- величине тока ОЗЗ,
- наличию генераторов и электродвигателей в сети (обязательное требование для ограничения перенапряжений).

Отсутствуют единые методики в расчетах уставок РЗ от ОЗЗ в сетях 6–35 кВ (в силу несовершенства применяемых), а также методы проверки чувствительности защит. Расчеты уставок срабатывания по току защиты от ОЗЗ на кабельных линиях, выполненных несколькими параллельными кабелями, уточняются натурными испытаниями. Трансформаторы тока нулевой последовательности (ТТНП) устанавливаются на каждый кабель, а их вторичные обмотки соединяются последовательно и нагружаются на пусковой орган (реле тока) защиты. Селективное срабатывание защиты зависит от технически правильного исполнения заземления оболочек силовых кабелей. Неисправность контактных соединений в первичной схеме приводит к неселективной работе защиты.

На воздушных линиях (ВЛ) схемы включения вторичных обмоток трансформаторов тока на сумму токов трех фаз (фильтр тока нулевой последовательности ($3 I_0$)), имеют большой ток небаланса, зависящий от характеристик и качества изготовления трансформаторов тока. Отстройка от тока небаланса приводит к значительному увеличению уставки по току срабатывания защиты.

Переходное сопротивление в месте ОЗЗ при обрыве на ВЛ провода и падении его на землю достига-

ет 5–7 кОм, ток ОЗЗ оказывается ниже расчетной уставки срабатывания защиты. В этом случае чувствительность защиты не обеспечивается, не срабатывает сигнализация от замыканий на землю.

При всех способах заземления нейтралей в сетях 6–10 кВ токовые защиты от ОЗЗ с ТТНП часто не отвечают требованиям селективности и чувствительности при ОЗЗ, однако они применяются и селективно отключают междуфазные короткие замыкания через землю.

От ОЗЗ в сетях 6–10 кВ применяются защиты [1]:

- по напряжению нулевой последовательности ($3 U_0$) (сигнализация);

- направленная токовая защита по току $3 I_0$ и напряжению $3 U_0$ на основной частоте 50 Гц;

- токовая защита по току $3 I_0$ на основной частоте 50 Гц;

- с наложением тока с частотой, отличной от 50 Гц;

- реагирующие на высокочастотные (ВЧ) составляющие в токе ОЗЗ, возникающие естественным путем (при переходных процессах во время горения дуги);

- реагирующие на напряжение $3 U_0$ и ток $3 I_0$ в переходных процессах.

Защита по напряжению нулевой последовательности с действием на отключение выполняется на одиночных линиях, отходящих от шин. Ее преимущество перед направленной защитой по току $3 I_0$ и другими защитами – минимум составляющих ВЧ гармоник, она лучше работает при перемежающейся дуге, на ней не сказывается влияние ДГР.

Эффективность направленных защит по току $3 I_0$ возрастает в сетях:

- с малым током при ОЗЗ с заземлением нейтрали через резистор с активным током 35–40 А в нейтрали, а с собственным емкостным током ОЗЗ – на присоединениях не более 5 А (типовая схема с ТТНП);

- в РУ-6 – РУ-10 кВ с ДГР на подстанциях промышленных предприятий, городских сетей с большим количеством кабельных линий с собственным емкостным током ОЗЗ на присоединениях не более 5 А.

Выполнить эффективную защиту по току $3 I_0$ без реактора в этом случае сложно: необходимо заземлить нейтраль через резистор с током 10–15 А.

Для решения проблемы селективной сигнализации ОЗЗ в компенсированных сетях разрабатываются *устройства защиты и сигнализации ОЗЗ*, основанные на использовании электрических величин переходного процесса. По принципу действия устройства используются также в сетях с изолированной нейтралью или с высокоомным заземлением нейтрали через резистор.

Наибольшее применение находят устройства, в которых определение поврежденного присоединения осуществляется с применением следующих двух способов:

- сравнение амплитуд переходных токов в присоединениях защищаемого объекта;

- определение знака мгновенной мощности нулевой последовательности в начальный момент пере-



ходного процесса.

По первому способу выполняются централизованные токовые устройства относительного замера, а по второму – направленные централизованные и автономные (индивидуальные) устройства защиты от ОЗЗ.

Автономные и централизованные устройства защиты от ОЗЗ реагируют только на электрические величины переходного процесса и не обладают необходимым свойством непрерывности действия, как при «металлических» (устойчивых) ОЗЗ.

На основе вышесказанного можно сделать следующие выводы:

1. Перенапряжения в сетях 6–35 кВ при ОЗЗ присутствуют при всех режимах заземления нейтрали и могут достигать 3,5–3,8 U_{ϕ} сети.

2. При ОЗЗ величина тока в месте замыкания из-

меняется в широких пределах и зависит от рабочего напряжения, схемы и протяженности сети, что не позволяет обеспечить отстройку и селективность при срабатывании защиты от ОЗЗ.

3. В токе ОЗЗ содержатся ВЧ гармоники. Частота и амплитуда гармоник зависят от добротности образованного колебательного контура.

4. Отсутствуют единые методики расчета уставок РЗ от ОЗЗ в сетях 6–35 кВ (в силу несовершенства применяемых), а также методы проверки чувствительности защит.

5. На основе результатов анализа условий работы, селективности и чувствительности защит от ОЗЗ в сетях 6–35 кВ можно говорить о необходимости разработки подходов к решению задач, обеспечивающих нормативные требования к релейной защите.

Статья поступила 16.12.2013 г.

Библиографический список

1. Бороухман В.А. Об эксплуатации селективных защит от замыканий на землю в сетях 6–10 кВ и мероприятиях по их совершенствованию // Энергетик. 2000. № 1. С. 20–22.
2. Евдокунин Г.А., Гудилин С.В., Корепанов А.А. Выбор способа заземления нейтрали в сетях 6–10 кВ // Электричество. 1998. № 12. С. 8–22.
3. Защита от перенапряжений в сетях 6–10 кВ / Ю.Ф. Васюра [и др.] // Электротехника. 1994. № 5, 6.
4. Кискачи В.М. Селективная сигнализация замыканий на землю с использованием высших гармоник // Электричество. 1967. № 9. С. 24–29.
5. Костенко М.В., Богатенков И.М., Михайлов Ф.Х. Перенапряжения при дуговых замыканиях на землю, включениях и отключениях индуктивных элементов. Итоги науки и техники. М.: ВИНТИ. Т. 17. 105 с.
6. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных

токов. М.: Энергия, 1971.

7. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей РФ. Утв. приказом Минэнерго РФ от 19.06.2003 г.

8. Правила устройства электроустановок. Изд. 7-е. Утв. приказом Минэнерго РФ от 08.07.2002 № 204.

9. РД 34.45-51.300-97. Объемы и нормы испытания электрооборудования.

10. Устинов А.А., Висящев А.Н. Итерационные методы определения места повреждения по параметрам аварийного режима при односторонних измерениях на воздушных линиях электропередач. Вестник Иркутского Государственного технического университета. 2010. № 5. С. 260–266.

11. Цпенко Е.Ф. Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. М.: Энергоатом издат, 1986.

УДК 63-83-52:519.768.2

МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ МЕТОД ПОИСКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ П-АЛГОРИТМА

© Л.С. Лебедев¹

Иркутский государственный технический университет, 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Дан обзор методов поиска неисправностей на примере электропривода буровой установки. Рассмотрен модернизированный метод поиска неисправностей применительно к функциональной схеме буровой установки. Проведен анализ методов поиска неисправностей. Представлены результаты их сравнения как между собой, так и с новым методом.

Ил. 7. Табл. 2. Библиогр. 2 назв.

Ключевые слова: автоматизированная система управления; алгоритм диагностирования; функциональная схема; структурная схема; методы поиска неисправностей.

UPGRADED TROUBLESHOOTING METHOD BASED ON P- ALGORITHM

L.S. Lebedev

Irkutsk State Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia.

The article gives a review of troubleshooting methods by example of an electric rig. It considers a modernized troubleshooting method as applied to the functional diagram of an electric rig. The troubleshooting methods have been analyzed

¹Лебедев Леонид Станиславович, аспирант, тел.: 89526161425, e-mail: lls200710-192@mail.ru
Lebedev Leonid, Postgraduate, tel.: 89526161425, e-mail: lls200710-192@mail.ru