

Электробезопасность и режим заземления нейтрали в электрических сетях напряжением 6–35 кВ

Ю. В. Целебровский,

Новосибирский государственный технический университет,
доктор технических наук, профессор,
действительный член Академии электротехнических наук РФ

Рассмотрены условия электробезопасности и надежности электрических сетей напряжением 6–35 кВ при различных режимах заземления нейтрали. Показано, что при выполнении норм, предписанных ПУЭ, режим изолированной нейтрали и продолжительные однофазные замыкания на землю делают сети указанных классов напряжения ненадежными и небезопасными. Это подтверждается статистикой аварийности в таких сетях. Та же статистика показывает малую эффективность заземления нейтрали через дугогасящий реактор. Наиболее эффективным решением можно назвать резистивное заземление нейтрали в сочетании с селективным отключением однофазных замыканий. Данный режим существенно увеличивает электробезопасность сети и повышает ее надежность.

Ключевые слова: заземление нейтрали, изолированная нейтраль, дугогасящий реактор, резистор, электробезопасность, напряжение прикосновения.

Электрические сети напряжением 6–35 кВ широко распространены в населенных местностях. С позиций электробезопасности особенностями таких сетей являются:

- доступность электроустановок для неквалифицированных лиц;
- неотключаемые в большинстве случаев длительные замыкания на землю, допускаемые «Правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей РФ» (п. 5.11.7) и «Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей» (п. 2.8.11);
- высокие значения сопротивления заземляющих устройств подстанций и опор воздушных линий электропередачи, нормируемые «Правилами устройства электроустановок» 7-го издания;
- вынос потенциала с заземляющих устройств подстанций 10(6)/0,4 кВ по нулевым рабочему и защитному проводникам сети 0,4 кВ при широко используемой системе TN (ГОСТ 30331.1-2013).

Ключевой опасной особенностью среди перечисленных является возможность длительной работы сети в режиме однофазного замыкания на землю. Эксплуатационный персонал ориентируется на неписанные правила, рекомендуемые продолжать эксплуатировать сеть в таком режиме, и, несмотря на наличие на рынке различных видов защит для селективного отключения однофазных замыканий на землю, в практике эксплуатации наблюдаются систематические прямые нарушения требований ПУЭ и ПТЭ, а именно:

1. Пунктами 5.11.7 ПТЭ электрических станций и сетей и 2.8.11 ПТЭ электроустановок потребителей «допускается работа воздушных и кабельных линий электропередачи с замыканием на землю до устранения повреждения». Следует заметить, однако, что пункт 1.1.17 ПУЭ гласит: «...Слово „допускается“

означает, что данное решение применяется в виде исключения, как вынужденное...». Следовательно, работа сети с замыканием на землю должна быть исключением, а не правилом.

2. Пункт 1.7.63 ПУЭ содержит требование: «Защита от замыкания на землю должна устанавливаться с действием на отключение по всей электрически связанной сети в тех случаях, в которых это необходимо по условиям безопасности...». Расположение воздушных линий и подстанций в населенных местностях – городах, поселках, садоводческих обществах и др. – полностью обуславливает необходимость отключения однофазного замыкания.

Если выйти за рамки нормативных требований и рассматривать вопрос по критериям электробезопасности, то существенными становятся высокие нормируемые значения для заземляющих устройств подстанций и опор воздушных линий электропередачи. В соответствии с 1.7.96 ПУЭ сопротивление заземляющего устройства R электроустановки при прохождении расчетного тока замыкания на землю I должно составлять

$$R \leq 250/I \quad (1)$$

и не превышать 4 Ом, если заземляющее устройство используется для заземления нейтрали сети 0,4 кВ (п. 1.7.101). Это означает, что ПУЭ допускают существование на заземляющем устройстве напряжения со значением до 250 В. Для трансформаторной подстанции напряжением 10(6)/0,4 кВ такое напряжение при замыкании на землю появляется и на нулевых рабочем и защитном проводниках, а следовательно, и на открытых проводящих частях оборудования сети 0,4 кВ. Согласно допустимым нормам напряжения прикосновения по ГОСТ 12.1.038-82, при продолжительности воздействия свыше одной

секунды допустимое напряжение прикосновения при частоте 50 Гц не должно превышать 20 В. Напряжение 105 В допускается при времени воздействия 0,5 с и 160 В при времени воздействия 0,2 с.

Таким образом, в соответствии с ГОСТ 12.1.038-82 при выполнении нормы на сопротивление заземления требуется обязательное отключение однофазного замыкания на землю. Если исходить из нормы на сопротивление заземления 4 Ом и допустимого напряжения прикосновения 20 В, то не отключать однофазные замыкания можно лишь в сетях с изолированной нейтралью и токами замыкания меньше 5 А.

Были проведены измерения напряжений прикосновения у ПС 10/0,4 кВ г. Ханты-Мансийска [1]. Результаты измерений показали, что, несмотря на малое сопротивление заземления, обеспечиваемое естественными заземлителями, напряжения прикосновения превышали значение 20 В в 30 % случаев (табл. 1).

Из табл. 1 можно видеть, что в большинстве случаев сопротивление заземления ТП ниже или близко к норме 4 Ом. Это обусловлено наличием естественных заземлителей: оболочек и экранов кабелей, повторным заземлением нулевого провода и т. п. В то же время у опор, на которых установлены разъединители, значения напряжений прикосновения превышают все допустимые нормы. Это связано с повышенным сопротивлением заземления опоры, заземлитель которой в момент измерений не был связан с заземлителем ТП. Нормы на сопротивление заземления опор существенно выше норм для ТП. Так, значение сопротивления заземляющего устройства опоры ВЛ 0,4 кВ должно быть не более 30 Ом (п. 2.4.38 ПУЭ), а для опор воздушных линий 10 кВ – 10, 15, 20 Ом (в зависимости от удельного сопротивления грунта, табл. 2.5.10 ПУЭ).

Все сказанное позволяет заключить, что работа электрической сети напряжением 6–35 кВ с изоли-

Таблица 1

Напряжения прикосновения в городских сетях, измеренные при однофазных замыканиях на землю [2]

Условное наименование электроустановки	Сопротивление заземления, Ом	Напряжение прикосновения при 0,33 В
ТП 123	0,08	5,1
ТП 20	0,07	0,25
ТП 26	0,04	1,2
ТП 6	0,2	2,5
ТП 166	0,06	0,64
РП8	0,05	2,2
ТП 3001	0,3	У внешнего ограждения: 43,9
		У привода разъединителя: 124,1
ТП 3024	0,12	У внешнего ограждения: 3,2
		У КТПН: 2,1
		У привода разъединителя: 4,4
ТП 3031	0,2	У внешнего ограждения: 3,4
		У привода разъединителя: 6,2
ТП 5112	0,28	У внешнего ограждения: 6,7
		У привода разъединителя: 3,2
ТП 3233	0,4	11,8
ТП 3202	0,85	20,8
ТП 1315	0,62	У металлического основания: 9
		У привода разъединителя: 654
Опора с разъединителем Ф 11	0,46	20,3
Опора № 17 с разъединителем	4,5	165
Опора № 12 с разъединителем	6,3	151
ТП 1316	5,5	У КТПН: 22,6
		У привода разъединителя: >1000 В
ТП 1313	0,25	У КТПН: 3,7
		У привода разъединителя: 3,7
ТП 1116	0,65	У КТПН: 10,5
		У привода разъединителя: >1000 В
ЯКНО10	0,7	У КТПН: 2,9
		У привода разъединителя: 2,9

рованной нейтралью в режиме длительного замыкания на землю возможна лишь при ряде условий:

- сопротивление заземляющего устройства подстанций не должно превышать значения 4 Ом;
- ток однофазного замыкания на землю не должен превышать 5 А;
- на воздушной линии, проходящей по населенной местности, для снижения напряжений прикосновения у опор должно быть выполнено выравнивание потенциала путем укладки вокруг опоры кольцевого горизонтального заземлителя и покрытия поверхности грунта (в радиусе 1 м и более от опоры) материалом с высоким удельным сопротивлением (асфальтом, щебнем и т. п.);
- в случае повышения норм на сопротивление заземления, разрешенного ПУЭ для грунтов с большим удельным сопротивлением (п. 1.7.108), до значения $R_{\text{норм}}$ допустимый длительный ток однофазного замыкания на землю вычисляется с помощью выражения:

$$I_{\text{доп длит}} \leq 20 \text{ В} / R_{\text{норм}} \quad (2)$$

Электрические сети только с таким током могут временно (до устранения повреждения) работать с однофазным замыканием на землю.

Далее рассмотрим заземление нейтрали сетей 6–35 кВ через дугогасящий реактор. Согласно своему предназначению, реактор должен гасить дуговое замыкание на землю путем компенсации емкостного тока и уменьшения тока дуги до очень малых значений, приводящих к погасанию дуги при переходе тока через «ноль». Успешным этот процесс может быть при двух условиях:

- если индуктивное сопротивление реактора всегда точно равно емкостному поперечному сопротивлению электрической сети;
- если повторного зажигания дуги при появлении напряжения на аварийной фазе не происходит.

Повторное зажигание дуги может произойти как при малых расстояниях между проводом и землей, так и при возможных перенапряжениях на проводе при разрыве тока не в «нуле».

Удовлетворительная настройка дугогасящего реактора реализуется лишь при выполнении требования п. 5.11.11 ПТЭ: «В сетях, работающих с компенсацией емкостного тока, напряжение несимметрии должно быть не выше 0,75 % фазного

напряжения. При отсутствии в сети замыкания на землю напряжение смещения нейтрали допускается не выше 15 % фазного напряжения длительно и не выше 30 % в течение 1 ч». В противном случае наличие напряжения в нейтрали вызовет нежелательные резонансные явления, зачастую способные привести к аварии. «Расстройка» реактора, приводящая (при разрешенной перекомпенсации) к замене емкостного тока индуктивным, чаще всего способствует возникновению устойчивой дуги и сводит на нет дугогасящее действие реактора. Следует заметить, что в большинстве сетей симметрированием емкостей проводов воздушных линий не занимаются, и реакторы работают в режиме значительной перекомпенсации.

С позиций электробезопасности можно было бы считать положительным явление снижения тока однофазного замыкания на землю при заземлении через дугогасящий реактор. Но есть два дополнительных обстоятельства:

1. Кроме дуговых замыканий возможны и металлические – прямое соединение провода с заземленной траверсой опоры или падение провода на землю. В последнем случае любая попытка приподнять упавший провод приводит к появлению на нем фазного напряжения и поражению человека. Соскальзывание провода со штыревого изолятора на траверсу происходит на опоре, сопротивление заземления которой высоко. Поэтому при поиске повреждения на воздушных линиях обслуживающий персонал может попасть под напряжение прикосновения (смертельные случаи при указанных обстоятельствах известны).

2. При однофазных замыканиях на землю на «здоровых» фазах возникают как минимум линейные напряжения. При перемежающейся дуге могут возникнуть перенапряжения. Все это может вызвать переход однофазного замыкания в двойное, двухфазное или трехфазное и отключение линии релейной защитой.

Был проведен анализ аварийных отключений в сетях 6–35 кВ одной из сетевых энергокомпаний за 8 лет эксплуатации. Сети указанных напряжений эксплуатировались с изолированной нейтралью и с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор. Число воздушных линий в сетях и статистические показатели отключений показаны в табл. 2.

Таблица 2

Удельное число отключений воздушных линий в сетях 6–35 кВ с различными режимами нейтрали

Напряжение сетей	Режим нейтрали	Число линий	Удельное число отключений, откл./ВЛ-год	Удельное число зафиксированных неотключаемых однофазных замыканий, ОЗЗ/ВЛ-год	Удельное число однофазных замыканий, перешедших в многофазные, ОЗЗ-КЗ/ВЛ-год
35 кВ	Заземленная через дугогасящий реактор	22	0,44±0,11	0,06±0,01	0,11±0,02
	Изолированная	13	1,07±0,11	0,02 ±0,01	0,05 ±0,01
6–10 кВ	Заземленная через дугогасящий реактор	185	1,02±0,05	0	0
	Изолированная	102	1,35±0,12	0,02 ±0,01	0,02 ±0,01

Из табл. 2 можно видеть, что удельные значения числа отключений в сетях напряжением 6–10 кВ с дугогасящим реактором и без него весьма близки. В сетях напряжением 35 кВ наличие дугогасящего реактора уменьшает удельное число отключений примерно в 2 раза.

Однако здесь следует обратить внимание на следующее обстоятельство. Известно, что доля однофазных замыканий на землю в электрических сетях составляет примерно 70 % от общего числа замыканий [3]. В собранной нами статистике эта цифра подтверждается для воздушных линий напряжением 110 кВ (порядка 69 %). Для сетей с изолированной нейтралью, как видно из табл. 2, эта доля составляет в большинстве случаев единицы процентов, включая и зафиксированный переход однофазных замыканий в короткие двух- и трехфазные замыкания. Причину этого следует искать прежде всего в том, что в многофазные замыкания переходят, по-видимому, те же 70 % (первоначально однофазных замыканий), но этот переход не фиксируется дежурным персоналом в оперативном журнале – фиксируется лишь сам факт отключения.

Переход однофазных замыканий в двух- и трехфазные, особенно в двойные замыкания (замыкание разных фаз на землю в разных точках сети) приводит к резкому увеличению тока замыкания и большим напряжениям прикосновения к оборудованию, сопротивление заземления которого не обеспечивает безопасных напряжений. Следует подчеркнуть, что это явление характерно и для сетей с изолированной нейтралью.

Изложенное позволяет говорить о низкой эффективности дугогасящих реакторов в эксплуатируемых электрических сетях 6–35 кВ. На этот факт следует обращать внимание во всех эксплуатирующих организациях и повышать эту эффективность путем симметрирования сетей и точной автоматической подстройкой дугогасящего реактора.

Альтернативой дугогасящему реактору служит установка в нейтрали сети 6–35 кВ резистора. В соответствии с п. 1.2.16 ПУЭ, нейтраль может заземляться «через дугогасящий реактор или резистор». Такая формулировка подчеркивает альтернативу. Если дугогасящий реактор снижает ток замыкания, то резистор его увеличивает, поэтому стоит отметить, что появившееся решение, называемое комбинированным заземлением нейтрали [4], является довольно дорогостоящим и неэффективным.

Заземление нейтрали через резистор увеличивает ток замыкания примерно в 1,4 раза, что в некоторых случаях снижает электробезопасность сети. Но резистивное заземление имеет следующие неоспоримые преимущества.

1. Резистор полностью устраняет дуговые перенапряжения и таким образом обеспечивает устойчивое однофазное замыкание, не переходящее в многофазное или двойное замыкание на землю.

2. Установка резистора в нейтраль сети исключает феррорезонансные явления и повреждения трансформаторов напряжения.

3. Активный ток резистора протекает только в поврежденном фидере, что существенно повышает надежность срабатывания защиты от однофазных замыканий.

Таким образом, сеть с заземлением нейтрали через резистор, оборудованная селективными защитами от замыканий на землю, является наиболее электробезопасной сетью. Кратковременное металлическое или дуговое замыкание на землю не переходит в многофазное и отключается релейной защитой. При дуговом замыкании дуга при отключении поврежденного присоединения гаснет, что обеспечивает успешное автоматическое повторное включение. Если принять тот факт, что однофазные замыкания предположительно составляют 50–70 % всех замыканий, то применение резистивного заземления наряду с селективным отключением и успешным автоматическим повторным включением позволит увеличить надежность сети в два-три раза. Опыт заземления нейтрали сети через резистор и селективного отключения поврежденных присоединений успешно опробован в городских электрических сетях г. Ханты-Мансийска и распределительных сетях различных регионов Сибири [1, 5].

Энергоемкие резисторы большой мощности для заземления нейтрали сетей напряжением 6–35 кВ разработаны и выпускаются опытным производством Новосибирского государственного технического университета [2]. На рис. 1 показана резисторная установка, подключенная в нейтраль трансформатора 35 кВ подстанции 110/35 кВ.



Рис. 1. Резисторная установка на подстанции 110/35 кВ

Опыт эксплуатации и исследований режима заземления нейтрали сетей напряжением 6–35 кВ показывает, что как с позиций надежности, так и в отношении электробезопасности наиболее правильным решением можно считать заземление нейтрали сети через резистор и селективное отключение однофазных замыканий. Такой вывод подтверждается и широким применением резистивного заземления в мировой практике.

Режим заземления нейтрали в электрических сетях напряжением 6–35 кВ существенно влияет как на капитальные и эксплуатационные затраты, связанные с обеспечением надежности сети и бесперебойностью энергоснабжения, так и на электробезопасность сети при аварийных ситуациях. Допускаемые в порядке исключения длительные однофазные замыкания на землю на практике приводят к появлению опасных напряжений прикосновения к заземленному оборудованию напряжением выше 1000 В и зануленному оборудованию напряжением до 1000 В и являются прямым нарушением требования п. 1.7.64 ПУЭ об обязательном отключении однофазных замыканий по условиям электробезопасности.

В сетях с изолированной нейтралью и с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор, при однофазных замыканиях на землю возникают перенапряжения, что обуславливает переход однофазного замыкания в двойное или многофазное. Это резко снижает электробезопасность и приводит к обязательному отключению поврежденного присоединения. Статистика показывает, что переход однофазного замыкания в двух- или трехфазное происходит с вероятностью более 90 %.

Заземление нейтрали через дугогасящий реактор в большинстве случаев проводится с наруше-

нием требований ПТЭ об обязательной симметрии сети, что вынуждает настраивать реактор на перекомпенсацию емкостного тока. При перекомпенсации реактор практически перестает выполнять свою функцию и становится дорогостоящим средством сохранения аварийного режима. При этом электробезопасность сети также может снизиться.

Оптимальным решением, обеспечивающим уменьшение капитальных и эксплуатационных затрат и существенное повышение электробезопасности сети, можно считать заземление нейтрали через резистор с одновременным применением селективной защиты от однофазных замыканий на землю. При этом полностью устраняются дуговые перенапряжения и переход однофазного замыкания в многофазное, исключаются феррорезонансные перенапряжения и повреждения трансформаторов напряжения, надежно работает селективная защита от однофазных замыканий и с вероятностью более 50 % обеспечивается успешное автоматическое повторное включение после отключения однофазного замыкания. Многолетний положительный опыт эксплуатации сетей с таким режимом позволяет рекомендовать его для распределительных и потребительских сетей напряжением 6–35 кВ.

Литература

1. Дмитриев С. Н., Нестеров С. В., Целебровский Ю. В. Электрические сети малых городов. Проблемы повышения надежности и безопасности // Новости электротехники. – 2010. – № 5. – С. 56–58.
2. Целебровский Ю. В. Расчет, конструкция и технология изготовления энергоемких проволочно-керамических резисторов // Электротехника. – 2000. – № 11. – С. 60–64.
3. Федосеев А. М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 520 с.
4. Катасонов С. М., Чиндяскин В. И., Кажаяев В. Ф. Ограничение перенапряжений в сетях 6–35 кВ с помощью резистивного заземления нейтрали // Известия ОГАУ. – 2008. – № 2(18). – С. 97–100.
5. Целебровский Ю. В., Березов Ю. И., Снисаренко А. В., Филиппов А. В. Опыт эксплуатации электрических сетей напряжением 6–35 кВ с резистивным заземлением нейтрали // Энергетика Тюменского региона. – 2003. – № 3. – С. 23–25.

Electrical safety and neutral grounding solutions in 6–35 kV electrical grids

Yu. V. Tselebrovskii,
Novosibirsk State Technical University,
Russia, Doctor of Science, professor

To determine optimal neutral grounding, many items should be considered. This paper discusses grounding practices used on electric distribution systems of 6–35 kV and electrical safety of such systems. In particular, the paper concentrates on the isolated neutral, arc suppression reactor, and resistor grounding solutions, addressing their benefits and disadvantages. The isolated neutral mode can be risky in case of long-time ground fault. Failure statistics just confirms this, as well as low efficiency of grounding with arc suppression reactors. The resistance neutral grounding system combined with selective ground fault protection are considered as the most efficient and safe for 6–35 kV electrical grids.

Keywords: neutral grounding, isolated neutral, arc suppression reactor, resistor, electrical safety, touch potential.