

УДК 621.316.1 + 621.315.1

КЛАССИФИКАЦИЯ ЗАЩИТ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 6–10 кВ ОТ ОБРЫВОВ ПРОВОДОВ

А.М. Ершов, А.В. Хлопова, Н.Ю. Хабаров

В статье проведён анализ авторских свидетельств и патентов на изобретения и представлена классификация устройств защиты воздушных линий напряжением 6–10 кВ (ВЛ 6–10 кВ) от обрывов фазных проводов. Для построения защиты ВЛ 6–10 кВ используют следующие основные виды режимных параметров: изменения линейных напряжений и напряжений фаз относительно земли; изменения обратной и нулевой составляющих в напряжениях и токах электрической сети. Для выявления режимов работы ВЛ 6–10 кВ используют следующие основные виды функциональных блоков: первичные ёмкостные и индуктивные фильтры напряжений обратной и нулевой последовательности, устанавливаемых на ВЛ 6–10 кВ; вторичные фильтры напряжений обратной и нулевой последовательности, устанавливаемые во вторичных цепях; логические схемы анализа режима.

Ключевые слова: воздушная линия напряжением 6–10 кВ, обрыв фазного провода, устройства защиты линии.

Достаточно распространённым видом повреждения распределительных электрических сетей напряжением 6–10 кВ является обрыв фазного провода воздушной линии электропередачи. В случае возникновения такого режима подключённые к повреждённой линии потребители электроэнергии будут работать в неполнофазном режиме, что негативно сказывается на их работе. Проведём классификацию устройств защиты воздушных линий напряжением 6–10 кВ от обрывов фазных проводов.

При обрыве фазного провода ВЛ 6–10 кВ происходит искажение векторной диаграммы линейных и фазных напряжений, исчезает ток повреждённой фазы [1, 2] – это может быть использовано для построения защиты ВЛ от обрыва фазного провода.

Защита, построенная на контроле величин линейных напряжений. При обрыве фазного провода ВЛ за местом обрыва деформируется треугольник линейных напряжений, при этом два линейных напряжения становятся равными половине линейного напряжения [3]. Изменения линейных напряжений позволяют выявить обрыв фазного провода.

Защиты, построенные на использовании сравнения величин токов. В устройстве, содержащем дифференциальное реле, реагирующим на разность двух токов, получаемых от включённых в контролируемую сеть трансформаторов тока и пропорциональных один току одной фазы сети,

а другой – разности токов двух других фаз [4]. При нормальном режиме работы ВЛ разность токов равна нулю, а при возникновении обрыва любого провода и исчезновении соответствующего тока баланс токов нарушается и дифференциальное реле срабатывает.

Для сравнения токов в устройстве [5] используется четырёхкатушечный электромагнит, две катушки которого включены в одну из фаз контролируемой сети, а две другие – в остальные фазы, в результате чего намагничивающие силы компенсируют друг друга. При обрыве любой из фаз равновесие магнитной системы электромагнита нарушается и формируется команда на отключение ВЛ.

Защиты, построенные на контроле напряжений ВЛ с помощью антенных фильтров. Для определения обрыва фазного провода или однофазного замыкания на землю используют два антенных фильтра (антенные преобразователи напряжения) одной ВЛ, расположенных симметрично под проводами воздушной линии [6]. При нормальном режиме работы ВЛ сигналы антенных фильтров равны и взаимно компенсируются, а при возникновении несимметрии сети (при однофазном замыкании на землю или обрыве провода) равенство сигналов нарушается и формируется сигнал, несущий информацию о возникновении несимметрии.

При обрыве фазного провода в напряжениях и токах электрической сети появляются составляющие нулевой и обратной последовательностей [1, 2], которые могут быть использованы для построения защиты ВЛ от обрыва фазного провода.

Защиты, реагирующие на токи нулевой последовательности электрической сети с изолированной нейтралью. В устройствах [7–9] для выявления обрыва фазного провода используются два трансформатора, устанавливаемых в начале и конце воздушной линии, нейтральные выводы первичных обмоток со схемой соединения «звезда» этих трансформаторов через активно-емкостные фильтры нулевой последовательности соединены с «землёй» – в результате организуется контур для циркуляции токов нулевой последовательности. При обрыве фазного провода токи нулевой последовательности вследствие несимметрии фаз электрической сети возрастают, что служит информацией для исполнительного органа защиты.

При неполнофазных режимах (обрыв провода, обрыв провода с замыканием на землю, перегорание предохранителей в одной из фаз) появляются токи обратной последовательности, равные по величине токам прямой последовательности [10, 11]. При нормальном режиме ВЛ токи обратной последовательности отсутствуют. Измеряя нагрузочный ток ВЛ, например, с помощью индукционного измерителя, выделяя из него с помощью фильтров составляющие токов прямой и обратной последовательностей, сравнивая их по величине, распознают нормальный и аварийный режимы работы ВЛ.

Защиты, использующие два антенных фильтра напряжения нулевой последовательности, устанавливаемых по разные стороны защищаемого объекта. Для выявления обрыва фазы по обе стороны от защищаемого объекта устанавливают два антенных (ёмкостных) фильтра нулевой последовательности, которые по дифференциальной схеме подключены к исполнительному органу [12–15]. При нормальном режиме работы выходные сигналы антенных фильтров равны нулю, а при обрыве фазы на защищаемом объекте на выходе антенного фильтра, расположенного за объектом, появляется сигнал, пропорциональный напряжению нулевой последовательности и подаваемый на исполнительный орган устройства защиты.

Защита, построенная на сравнении напряжений нулевой последовательности здоровой и поврежденной ВЛ. В устройстве [16], в котором в качестве нуль-органа используется фильтр напряжения нулевой последовательности, на два входа которого подаются напряжения с двух ВЛ, отходящих от одной подстанции. При нормальном режиме работы ВЛ их уровни напряжений нулевой последовательности одинаковы и выходной сигнал нуль-органа отсутствует. При обрыве фазного провода в какой-либо ВЛ в ней возрастает напряжение нулевой последовательности, нуль-орган срабатывает и указывает повреждённую ВЛ.

Защита, использующая фильтры напряжений обратной и нулевой последовательности, установленные в сети 10 кВ. В конце ВЛ-10 кВ под проводами установлены два индукционных фильтра токов – один нулевой последовательности, а второй комбинированный нулевой и обратной последовательностей [17]. При однофазном замыкании на землю в электрической сети возникают только токи нулевой последовательности, а при обрыве фазного провода – токи нулевой и обратной последовательности. Соответственно первый фильтр выявляет только однофазные замыкания на землю, а второй фильтр реагирует как на однофазные замыкания на землю, так и обрывы фазного провода. Построенная определённым образом логическая часть исполнительного органа устройства защиты позволяет идентифицировать отдельно однофазное замыкание и обрыв фазного провода.

Защиты, использующие фильтр обратной последовательности и фильтр нулевой последовательности, установленные в электрической сети напряжением 380 В. Фильтры установлены на стороне низшего напряжения силового трансформатора напряжением 6–10/0,38 кВ [18, 19]. При обрыве фазного провода в электрической сети напряжением 6–10 кВ в сети возникают напряжения обратной и нулевой последовательностей, но в электрическую сеть 380 В напряжения нулевой последовательности не трансформируются, поэтому данное повреждение будет чувствовать только фильтр напряжения обратной последовательности и, следовательно, при отсутствии сигнала с фильтра нулевой последовательности его выходной сигнал будет нести информацию об обрыве провода ВЛ. При обрыве фаз-

ного провода электрической сети напряжением 380 В за местом повреждения появляются напряжения обратной и нулевой последовательности и оба фильтра, если они установлены в конце воздушной линии, почувствуют свои составляющие и, следовательно, появление выходных сигналов с обоих фильтров будет нести информацию об обрыве провода ВЛ-380 В.

Защита, использующая фильтр напряжения нулевой последовательности, установленный в конце ВЛ-10 кВ перед силовым трансформатором 10/0,38 кВ, и фильтр напряжения обратной последовательности, установленный в электрической сети напряжением 380 В [20]. При однофазном замыкании на землю в электрической сети напряжением 6–10 кВ в сети появляются напряжения нулевой последовательности, а при обрыве провода ВЛ появляются напряжения нулевой и обратной последовательности, но через силовой трансформатор проходят только напряжения обратной последовательности. Следовательно, антенный фильтр напряжения нулевой последовательности будет фиксировать однофазные замыкания на землю и обрывы фазных проводов ВЛ, фильтр напряжений обратной последовательности будет реагировать только на обрывы фазных проводов ВЛ. Построенная определённым образом логическая часть исполнительного органа устройства защиты позволяет идентифицировать отдельно однофазное замыкание и обрыв фазного провода.

Защита, построенная на измерении частоты пульсаций выпрямленного напряжения. С помощью датчиков Холла, установленных вблизи фазных проводов, выпрямителя и фильтра контролируется частота пульсаций на выходе выпрямителя [21]. При нормальном режиме работы частота равна 150 Гц, а при обрыве провода – 100 Гц. При изменении частоты срабатывает исполнительный орган устройства защиты.

Защиты, построенные на использовании напряжений фаз сети относительно земли и напряжения нейтрали. Указанные напряжения, получаемые от трёхфазного трёхобмоточного трансформатора напряжения, анализируются по величине, сравниваются с определёнными уставками по напряжению и далее с использованием логических схем фиксируют фазу, в которой произошло однофазное замыкание или произошёл обрыв фазного провода [22–30].

Защиты, построенные на измерении симметрии напряжений фаз. При наличии напряжений на всех трёх фазах электрической сети на выходах фильтров нулевой последовательности, различного рода выпрямителей [31–34] выходной сигнал равен нулю. При исчезновении какого-либо напряжения появляющийся выходной сигнал запускает исполнительный орган устройства защиты.

Защиты, построенные на измерении симметрии нагрузочных токов. Три трансформатора тока, вторичные обмотки которых соединены по схеме фильтра токов нулевой последовательности [35, 36], позволяют выявлять работу электрической сети в двухфазном режиме.

Заключение. 1. Для построения защиты ВЛ 6–10 кВ используют следующие основные виды режимных параметров: изменения линейных напряжений и напряжений фаз относительно земли; изменения обратной и нулевой составляющих в напряжениях и токах электрической сети.

2. Для выявления режимов работы ВЛ 6–10 кВ используют следующие основные виды функциональных блоков: первичные ёмкостные и индуктивные фильтры напряжений обратной и нулевой последовательности, устанавливаемых на ВЛ 6–10 кВ; вторичные фильтры напряжений обратной и нулевой последовательности, устанавливаемые во вторичных цепях; логические схемы анализа режима.

Библиографический список

1. Федосеев, А.М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей / А.М. Федосеев. – М. Энергоатомиздат, 1984. – 520 с.
2. Переходные процессы в электроэнергетических системах / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев, В.В. Пираторов; под ред. И.П. Крюčkова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 416 с.
3. А. с. 1034116 СССР, М. Кл. Н 02 3/16. Устройство для защиты от однофазных повреждений в электрической сети с изолированной нейтралью / Э.Д. Шефер, В.О. Жидков, Ю.Н. Ильин, Ю.А. Меновщиков – № 3369497/24-07; заявл. 18.12.1981; опубл. 07.08.1983, Бюл. № 29. – 4 с.
4. А. с. 107440 СССР, Кл. 21с. Устройство для защиты трехфазной сети с изолированной нейтралью от обрыва фазы / Г.И. Атабеков, А.В. Гордон, А.В. Каменский, В.Г. Тер-Захарянц. – № 552986; заявл. 07.06.1956. – 2 с.
5. А. с. 112334 СССР, Кл. 21с. Устройство для выявления обрыва одной из фаз трехфазной цепи / А.Г. Пинчук. – № 430130/554773; заявл. 19.06.1950. – 3 с.
6. А. с. 864425 СССР, М. Кл.³ Н 02 J 3/00, Н 02 Н 5/10. Воздушная линия электропередачи трехфазного переменного тока в сети с изолированной нейтралью / Р.Ш. Сагутдинов, А.И. Селивахин, А.П. Кузнецов. – № 2798299/24-07; заявл. 18.07.1979; опубл. 15.09.1981, Бюл. № 34. – 3 с.
7. Пат. на п. м. 87967 Российская Федерация, МПК В 60 М 3/00, В 60 М 1/12. Устройство определения обрыва изолированных проводов воздушных линий напряжением свыше 1000 В при их расположении на опорах контактной сети переменного тока в зонах сближения с высоковольтными ЛЭП / А.Б. Косарев, Д.Г. Кузнецов, С.Л. Москвин – № 2009119221/22; заявл. 22.05.2009; опубл. 27.10.2009. – 9 с.
8. Пат. на п. м. 96354 Российская Федерация, МПК В 60 М 3/00, В 60 М 1/12. Устройство для определения обрыва и фиксации поврежденной фазы изолированных проводов воздушных линий напряжением свыше 1000 В при их расположении на опорах контактной сети переменного тока / Б.И. Косарев, Д.Г. Кузнецов, И.В. Буйлов. – № 2010102828/22; заявл. 29.01.2010; опубл. 27.07.2010. – 10 с.
9. Пат. на п. м. 85410 Российская Федерация, МПК В 60 М 3/00. Устройство определения обрыва изолированных проводов воздушных линий напряжением

свыше 1000 В при их расположении на опорах контактной сети переменного тока / А.Б. Косарев, Д.Г. Кузнецов, С.В. Логинов. – № 2009108971/22; заявл. 13.03.2009; опубл. 10.08.2009. – 8 с.

10. А. с. 499626 СССР, М. Кл.² Н 02 Н 5/10. Способ обнаружения неполнофазных режимов в воздушных электрических сетях с изолированной нейтралью / А.И. Селивахин, М.И. Пронникова, Д.Д. Якубовский. – № 1950208/24-7; заявл. 31.08.1973; опубл. 15.01.1976, Бюл. № 2. – 2 с.

11. А. с. 502440 СССР, М. Кл.² Н 02 Н 5/10. Устройство обнаружения неполнофазных режимов в воздушных электрических сетях / А.И. Селивахин, М.И. Пронникова, Д.Д. Якубовский, Б.А. Грещенко, В.А. Островский. – № 1950205/24-7; заявл. 31.07.1973; опубл. 05.02.1976, Бюл. № 5. – 2 с.

12. А. с. 736257 СССР, М. Кл.² Н 02 Н 5/10. Устройство для защиты трехфазной электроустановки переменного тока от повреждения / А.П. Кузнецов, А.А. Кудрявцев, А.П. Рыжков, А.И. Селивахин, Р.Ш. Сагутдинов. – № 2504305/24-07; заявл. 23.06.1977; опубл. 25.05.1980, Бюл. № 19. – 4 с.

13. А. с. 792455 СССР, М. Кл.³ Н 02 Н 3/24, Н 02 Н 5/10. Устройство для защиты трехфазной электроустановки переменного тока от несимметричных режимов / Р.Ш. Сагутдинов, А.И. Селивахин, И.Л. Слонов, И.Г. Беляков, В.А. Островский, А.П. Кузнецов, В.И. Сукманов, Б.А. Грещенко. – № 2613370/24-07; заявл. 04.05.1978; опубл. 30.12.1980, Бюл. № 48. – 4 с.

14. А. с. 803079 СССР, М. Кл.³ Н 02 Н 05/10, Н 02 Н 3/24, G 01 R 29/18. Устройство для контроля неполнофазных режимов работы электрической сети / Н.М. Зуль, Р.Ш. Сагутдинов, А.И. Селивахин, А.П. Кузнецов, Е.А. Кузнецов. – № 2702174/24-07; заявл. 26.12.1978; опубл. 07.02.1981, Бюл. № 5. – 4 с.

15. А. с. 805466 СССР, М. Кл.³ Н 02 Н 3/24, Н 02 Н 5/10. Устройство для защиты от несимметричного режима работы участка трехфазной сети переменного тока с изолированной нейтралью / А.И. Селивахин, И.Л. Слонов, Р.Ш. Сагутдинов, А.П. Кузнецов. – № 2552532/24-07; заявл. 07.12.1977; опубл. 15.02.1981, Бюл. № 6. – 3 с.

16. А. с. 1348941 СССР, М. Кл. Н 02 Н 7/09, Н 02 Н 5/10. Устройство для защиты трехфазных электрических цепей от обрыва фазных проводов / Н.М. Попов, А.Н. Попов. – № 3920382/24-07; заявл. 02.10.1987; опубл. 30.10.1987, Бюл. № 40. – 2 с.

17. А. с. 1192029 СССР, М. Кл. Н 02 J 3/00, Н 02 Н 5/10, Н 02 Н 3/16. Воздушная линия электропередачи с фильтром выявления несимметричного режима / И.Г. Беляков, Р.Ш. Сагутдинов, Л.Д. Суров. – № 3758292/24-07; заявл. 22.05.1984; опубл. 15.11.1985, Бюл. № 42. – 7 с.

18. Пат. на п. м. 94077 Российская Федерация, МПК Н 02 Н 99/00. Устройство для обнаружения трехфазных сетей с обрывами фазных проводов / Н.М. Попов, А.Н. Клочков. – № 2009148481; заявл. 25.12.2009; опубл. 10.05.2010. – 7 с.

19. Клочков, А.Н. Устройство для обнаружения трехфазных сетей с обрывом фазного провода / А.Н. Клочков // Вестник КрасГАУ. – 2011. – № 1. – С. 221–223.

20. А. с. 792439 СССР, М. Кл.³ Н 02 Н 3/16, Н 02 Н 5/10. Устройство для защиты участка воздушной линии электропередачи с изолированной нейтралью от несимметричных режимов / Р.Ш. Сагутдинов, А.И. Селивахин, А.П. Кузнецов, Ф.Д. Кузнецов. – № 2659280/24-07; заявл. 31.08.1978; опубл. 30.12.1980, Бюл. № 48. – 4 с.

21. А. с. 573836 СССР, М. Кл.² Н 02 Н 5/10. Устройство для защиты трехфазной сети от обрыва фазы / В.А. Демаков. – № 2177583/07; заявл. 03.10.1975; опубл. 25.09.1977, Бюл. № 35. – 2 с.

22. А. с. 815833 СССР, М. Кл.² Н 02 Н 3/24, Н 02 Н 5/10. Устройство для защиты от несимметричного режима работы электрической сети с изолированной или некомпенсированной нейтралью / А.М. Ершов, О.А. Петров. – № 2775470/24-07; заявл. 05.06.1979; опубл. 23.03.1981, Бюл. № 11. – 3 с.

23. А. с. 1023494 СССР, М. Кл. Н 02 Н 3/16. Устройство для определения режима работы электрической сети с изолированной или компенсированной нейтралью / А.М. Ершов, О.А. Петров, Ю.В. Исаев. – № 3387655/24-07; заявл. 22.01.1982; опубл. 15.06.1983, Бюл. № 22. – 6 с.

24. А. с. 1050031 СССР, М. Кл. Н 02 Н 3/16, Н 02 Н 3/24, Н 02 Н 5/10. Устройство для определения режима электрической сети / А.М. Ершов, О.А. Петров. – № 3275380/24-07; заявл. 10.04.1981; опубл. 23.10.1983, Бюл. № 39. – 6 с.

25. А. с. 1053205 СССР, М. Кл. Н 02 Н 3/16. Устройство для сигнализации аварийных режимов работы в электрических сетях с изолированной нейтралью / Б.Н. Андрущенко, М.И. Загороднев, В.И. Шапошников. – № 3450879/24-07; заявл. 10.06.1982; опубл. 07.11.1983, Бюл. № 41. – 4 с.

26. А. с. 1101950 СССР, М. Кл. Н 02 Н 3/16, Н 02 Н 5/10. Устройство для защиты от обрыва и замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью / В.И. Сукманов, Р.Ш. Сагутдинов, В.И. Григорьев. – № 3411118/24-07; заявл. 16.03.1982; опубл. 07.07.1984, Бюл. № 25. – 4 с.

27. А. с. 1136244 СССР, М. Кл. Н 02 Н 3/16, Н 02 Н 5/10. Устройство для защиты от неполнофазных режимов в электрической сети с изолированной нейтралью / Э.Д. Шефер, В.О. Жидков, А.А. Сарапов. – № 3598066/24-07; заявл. 03.06.83; опубл. 23.01.1985, Бюл. № 3. – 5 с.

28. А. с. 1145400 СССР, М. Кл. Н 02 Н 3/16, Н 02 Н 5/10. Устройство для защиты от обрыва и замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью / Р.Ш. Сагутдинов, И.Г. Беляков, В.И. Сукманов, В.А. Григорьева. – № 3482648/24-07; заявл. 23.08.1982; опубл. 15.03.1985, Бюл. № 10. – 5 с.

29. А. с. 1302367 СССР, М. Кл. Н 02 Н 5/10, Н 02 Н 3/16. Устройство для сигнализации аварийных и неполнофазных режимов в электрических сетях / Б.Н. Андрущенко, М.И. Загороднев, В.И. Шапошников. – № 3890302/24-07; заявл. 23.04.1985; опубл. 07.04.1987, Бюл. № 13. – 4 с.

30. А. с. 1350732 СССР, М. Кл. Н 02 Н 3/16, Н 02 Н 5/10. Устройство для защиты от неполнофазных режимов в электрической сети с изолированной нейтралью / Э.Д. Шефер, В.О. Жидков, А.А. Сарапов. – № 3963131/24-07; заявл. 14.10.1985; опубл. 07.11.1987, Бюл. № 41. – 3 с.

31. А. с. 335763 СССР, М. Кл. Н 02 Н 3/16. Устройство для определения поврежденной фазы / Н.Ф. Шишкин, В.И. Микрюков, В.В. Шкабер, Б.М. Ягудаев. – № 1487097/24-07; заявл. 29.10.1970; опубл. 11.04.1972, Бюл. № 13. – 2 с.

32. А. с. 420042 СССР, М. Кл. Н 02 Н 7/09. Устройство для обнаружения неполнофазных режимов / В.К. Зайцевский, П.В. Афанасьев. – № 1692320/24-07; заявл. 30.08.1971; опубл. 15.03.1974, Бюл. № 10. – 2 с.

33. А. с. 639077 СССР, М. Кл.² Н 02 Н 7/08. Устройство для обнаружения неполнофазных режимов трехфазной сети / Е.В. Финогенов, И.Ф. Корчагин, В.В. Пучкова. – № 2533756/24-07; заявл. 10.10.1977; опубл. 25.12.1978, Бюл. № 47. – 2 с.

34. А. с. 658644 СССР, М. Кл.² Н 02 Н 3/16, G 01 R 31/08. Устройство для определения поврежденной фазы сети с контуром заземления / А.С. Крохалев, Г.А. Багаутинов, С.Н. Новокрещенов. – № 2484248/24-07; заявл. 11.05.1977; опубл. 25.04.1979, Бюл. № 14. – 3 с.

35. А. с. 141201 СССР, Кл 21с. Устройство для защиты трехфазных электродвигателей и электрических установок переменного тока от работы на двух фазах / В.Ф. Стекольников, В.М. Алексеев, В.И. Кузнецов, О.Н. Никулин. – № 696351/24-7; заявл. 06.02.1961; опубл. 01.01.1961. – 2 с.

36. А. с 141921 СССР, Кл 21с. Устройство для защиты трехфазных электроустановок от обрыва цепи одной фазы, в частности корабельных / В.Ф. Стекольников, В.М. Алексеев, В.И. Кузнецов, О.Н. Никулин. – № 696352/24; заявл 06.02.1961; опубл. 1961. – 3 с.

[К содержанию](#)