

Совершенствование методов определения места повреждения на линиях электропередачи

Ю.В. БЫЧКОВ, В.Н. КОЗЛОВ, А.О. ПАВЛОВ, П.Н. ПИВОВАРОВ

ООО «НПП Бреслер»

Россия

yura@bresler.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Линия электропередачи, определение места повреждения, алгоритмическое моделирование, многоконцевые сети.

1 ВВЕДЕНИЕ

Задача определения места повреждения (ОМП) всегда была и остаётся актуальной, поскольку её решение направлено на повышение надёжности энергоснабжения. Важную роль в решении задачи определения места повреждения играет алгоритмическое моделирование линий электропередачи (ЛЭП). От адекватности модели ЛЭП зависит точность методов ОМП.

Существующие одно- и двухсторонние методы локации не рассчитаны на электропередачи с тремя и большим числом узлов питания и не приспособлены к локации повреждений на линиях ответвительных подстанций. Эти недостатки, а также наличие многоконцевых линий электропередачи (ЛЭП) 110-500 кВ, делают актуальной задачу развития и совершенствования методов ОМП.

С наличием дополнительной подпитки связана задача предварительной идентификации повреждённого участка линии. В докладе представлено решение, использующее контрольные замеры напряжения текущего режима, которые получаются при переходе от электрических величин по концам лучей питания к точке их соединения посредством соответствующих алгоритмических моделей.

Рассмотрен общий случай многостороннего ОМП, когда в линии выделяются участки двух типов: питающие и внутренние. Питающий участок отходит от шин системы и наблюдается на одной из своих сторон. Внутренний участок наблюдением не охвачен. Процедура определения места повреждения разбивается на три этапа:

1. попарным объединением векторов наблюдения (как реальных, так и виртуальных) определяются виртуальные замеры на концах всех участков схемы;

2. линия разделяется относительно своих узлов на трёхлучевые фрагменты, и по замерам на их концах определяется повреждённый участок;

3. выполняется процедура двухстороннего ОМП на найденном отрезке модели с использованием алгоритмической модели повреждённого участка и векторов наблюдения на его концах.

2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

2.1 Постановка задачи

Рассмотрим линию с трёхсторонним питанием, изображённую на рисунке 1. Буквой n обозначена точка соединения лучей питания, а цифрами – их номера. Исходными данными являются параметры ЛЭП, а также замеры напряжений $\underline{U}_k = [\underline{U}_{A.k} \quad \underline{U}_{B.k} \quad \underline{U}_{C.k}]^T$ по концам лучей и токи $\underline{I}_k = [I_{A.k} \quad I_{B.k} \quad I_{C.k}]^T$,

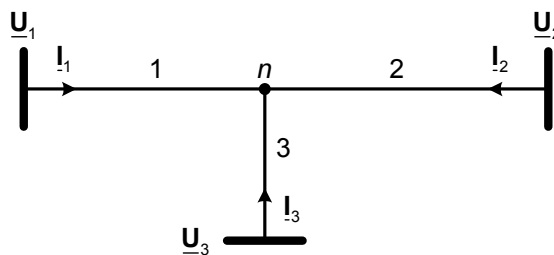


Рис. 1: Пример схемы с трёхсторонним питанием

текущие от шин в линию, как в предшествующем (нормальном), так и текущем (аварийном) режимах работы сети. В обозначениях k – номер луча.

Рассмотрим результаты локации при однофазном коротком замыкании фазы A на всех трёх лучах схемы. Расчёт вёлся со стороны первого участка, т.е. использовался односторонний замер $[\underline{U}_1 \ I_1]^T$ и АМО линии, построенная от шин системы 1. В Табл. 1 приведены действительные координаты повреждения X_f и результаты локации (оценки места аварии) $\hat{X}_f$. Расстояния отсчитывались от шин соответствующих систем.

Повреждённый луч схемы	Длина луча, км	X_f , км	$\hat{X}_f$, км до процедуры идентификации	$\hat{X}_f$, км после процедуры идентификации
Первый	45	21	20,9624	—
Второй	63	29	13,3811	28,9603
Третий	57	38	24,4639	38,0129

Табл. 1

Как видим, результат ОМП можно считать достоверным лишь в том случае, когда для расчёта используются замеры напряжений и токов и алгоритмическая модель со стороны именно повреждённого луча (в данном случае первого). Таким образом, возникает задача нахождения критерия идентификации повреждённого участка линии и разработки метода формирования модели ЛЭП, которая в дальнейшем будет применена в алгоритме ОМП.

2.2 Идентификация повреждённого участка

Согласно методу наложения, расчёт замыкания можно заменить расчётом предшествующего и чисто аварийного режимов (рисунок 2).

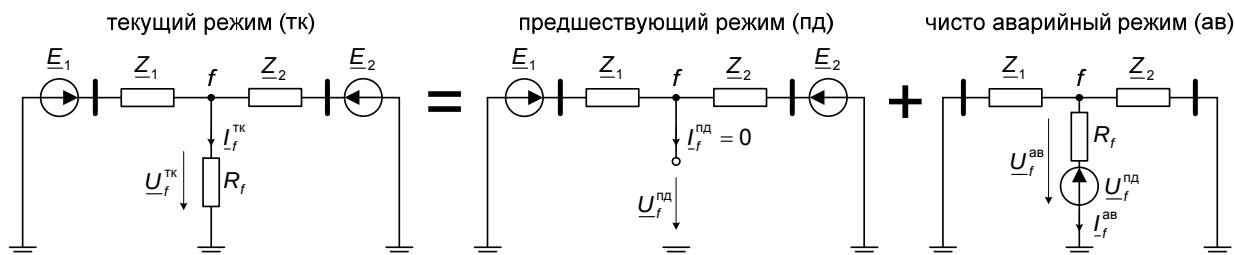


Рис. 2: Представление режима замыкания

В схеме последнего действует источник аварийной мощности, который определяет поперечную несимметрию, а следовательно, и повреждённый участок линии.

Для решения задачи идентификации используются контрольные замеры напряжения, которые получаются при переходе от электрических величин по концам лучей питания к точке n посредством соответствующих АМО (рисунок 3).

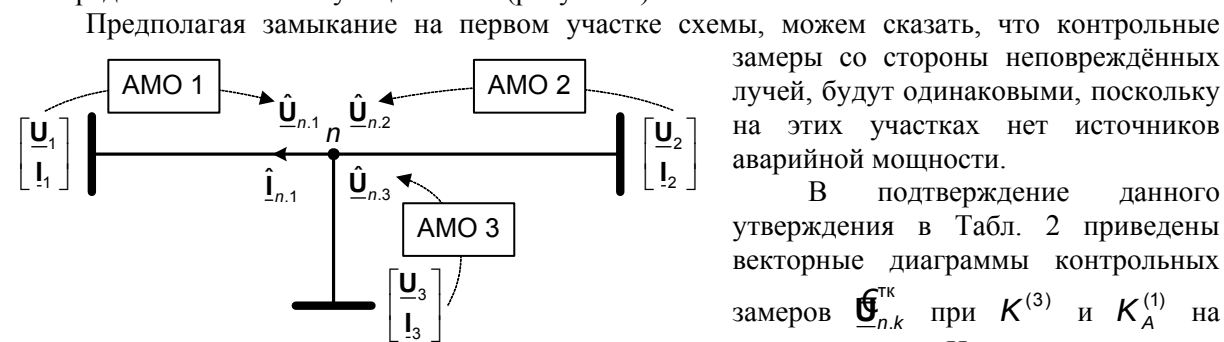


Рис. 3: Получение контрольных замеров напряжения

совпадают, а величины, соответствующие участку, на котором произошла авария, отличаются от них (выделены на диаграммах).

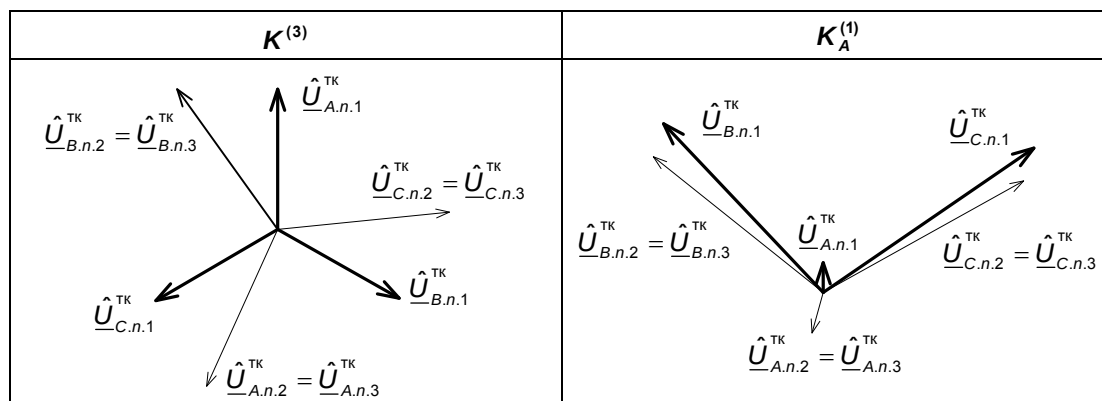


Табл. 2

Анализ показал, что следующий критерий однозначно выявляет два неповреждённых участка из трёх при всех видах замыканий

$$\min \left(\left| \hat{U}_{\lambda.n.1}^{\text{TK}} - \hat{U}_{\lambda.n.2}^{\text{TK}} \right|; \left| \hat{U}_{\lambda.n.1}^{\text{TK}} - \hat{U}_{\lambda.n.3}^{\text{TK}} \right|; \left| \hat{U}_{\lambda.n.2}^{\text{TK}} - \hat{U}_{\lambda.n.3}^{\text{TK}} \right| \right). \quad (1)$$

Например, при КЗ на втором луче питания минимальной окажется разность $\left| \hat{U}_{\lambda.n.1}^{\text{TK}} - \hat{U}_{\lambda.n.2}^{\text{TK}} \right|$. В данных выражениях буквой λ обозначена фаза, напряжение которой используется для идентификации и чей выбор зависит от вида повреждения (соответствие приведено в Табл. 3).

	Вид короткого замыкания		
	$K^{(3)}$	$K^{(1)}$	$K^{(2)}$ и $K^{(1,1)}$
Фаза λ	Любая фаза	Повреждённая фаза	Любая из повреждённых фаз

Табл. 3: Выбор фазы контрольного замера

В результате, алгоритм идентификации повреждённого участка сводится к трём этапам:

- 1) вычисляются контрольные замеры напряжения в точке n ;
- 2) после определения вида повреждения выбирается фаза λ ;
- 3) к величинам $\hat{U}_{\lambda.n.1}^{\text{TK}}$, $\hat{U}_{\lambda.n.2}^{\text{TK}}$ и $\hat{U}_{\lambda.n.3}^{\text{TK}}$ применяется критерий (1) и выявляется

повреждённый луч.

В дальнейшем, при определении места повреждения используются наблюдаемые величины напряжений и токов и алгоритмическая модель со стороны выбранного участка. О повышении точности говорят результаты ОМП (Табл. 1), полученные после применения описанной процедуры идентификации.

2.3 ОМП в трёхлучевой схеме

Сложность трёхстороннего ОМП в рассматриваемых сетях заключается в том, что для расчётов, как уже было показано выше, мы можем использовать величины напряжений и токов, зафиксированные по концам именно повреждённого участка ЛЭП. Если со стороны шин систем векторы $\underline{U}$ и $\underline{I}$ нам доступны, то напряжения $\underline{U}_n$ в месте соединения лучей и токи $\underline{I}_n$, текущие от точки n в повреждённую линию (в нашем примере это вектор $\underline{I}_{n.1}$, изображённый на рисунке 3), неизвестны. Решить данную проблему позволяют алгоритмические модели, составленные относительно концов неповреждённых участков.

В качестве напряжения в точке n можно взять вектор оценок $\hat{\underline{U}}_n$, полученный ранее: АМО второго и третьего участков находятся в равных условиях, поэтому «наблюдаемыми»

величинами могут стать как $\hat{\underline{U}}_{n,2}$, так и $\hat{\underline{U}}_{n,3}$. С токами дело обстоит сложнее, т.к. ни одна из выбранных алгоритмических моделей не может дать адекватной оценки величины $\hat{\underline{I}}_{n,1}$.

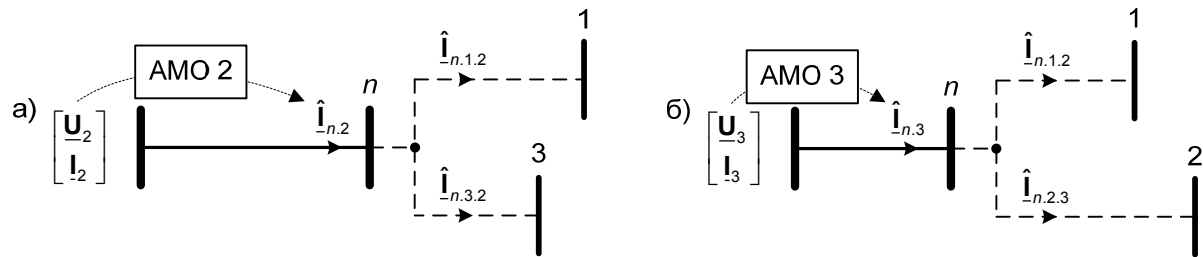


Рис. 4: Алгоритмические модели второго (а) и третьего (б) участков

Из рисунка 4 видно, что АМО второго участка позволяет найти лишь оценку тока в конце своего луча, которая представляет собой сумму

$$\hat{\underline{I}}_{n,2} = \hat{\underline{I}}_{n,1,2} + \hat{\underline{I}}_{n,3,2}. \quad (2)$$

То же можно сказать и о третьей алгоритмической модели. Вторая цифра в индексах векторов обозначает номер АМО, которая позволяет найти соответствующую оценку. Исходя из рисунка 3, также можно записать следующие равенства

$$\hat{\underline{I}}_{n,3} = -\hat{\underline{I}}_{n,3,2}, \quad (3)$$

$$\hat{\underline{I}}_{n,1,2} = \hat{\underline{I}}_{n,1,3} = \hat{\underline{I}}_{n,1}, \quad (4)$$

которые после подстановки их в (2) дадут выражение для искомой величины

$$\hat{\underline{I}}_{n,1} = \hat{\underline{I}}_{n,2} + \hat{\underline{I}}_{n,3}. \quad (5)$$

Следует заметить, что данную операцию можно выполнять лишь в том случае, когда замеры напряжений и токов по концам питания синхронизированы между собой. Этот вопрос требует дополнительного рассмотрения и будет описан в отдельном пункте.

Для получения оценок напряжения $\hat{\underline{U}}_f$ в предполагаемой точке повреждения f и токов $\hat{\underline{I}}_f$ в аварийной ветви, необходимых для локации повреждения, будут использоваться алгоритмическая модель повреждённого участка и величины $[\underline{U}_1 \quad \underline{I}_1]^T$ и $[\hat{\underline{U}}_n \quad \hat{\underline{I}}_{n,1}]^T$ по его концам.

Таким образом, процедура ОМП в сети с тремя лучами питания разбивается на четыре этапа:

- 1) идентификация повреждённого участка по описанному выше алгоритму;
- 2) получение оценок напряжений в точке n ($\hat{\underline{U}}_{n,2}$, $\hat{\underline{U}}_{n,3}$) и токов в конце неповреждённых лучей ($\hat{\underline{I}}_{n,2}$, $\hat{\underline{I}}_{n,3}$) по соответствующим алгоритмическим моделям и наблюдаемым величинам;
- 3) формирование виртуальных замеров (ВЗ) $\hat{\underline{U}}_n$ и $\hat{\underline{I}}_{n,1}$, «фиксируемых» в конце повреждённого участка;
- 4) применение алгоритма двухстороннего ОМП и нахождение места аварии.

2.4 Синхронизация замеров

Поскольку величины напряжений и токов, фиксируемых по концам питания, между собой не синхронизированы, т.е. каждая из систем $[\underline{U}_k \quad \underline{I}_k]^T$ построена относительно своего базового вектора $\underline{U}_{A,k}$, напрямую использовать их для получения ВЗ нельзя. Однако при этом необходимо найти такое решение, которое бы не требовало использования дополнительных аппаратных средств привязки регистрирующих устройств к единому времени.

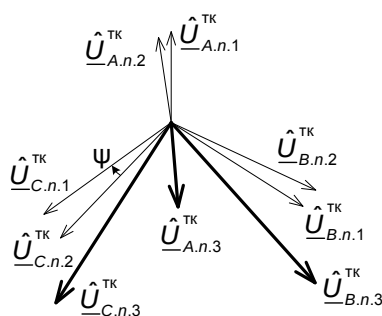


Рис. 5: Диаграмма оценок напряжений в случае несинхронизированных замеров

На рисунке 5 приведена диаграмма для случая $K_A^{(1)}$ на третьем луче, построенная при пересчёте несинхронизированных замеров к точке n . Как видим, оценки $\hat{U}_n$ со сторон первого и второго участков не совпадают. Данный факт, как показали исследования, не влияет на точность определения повреждённого луча по критерию (1), однако он не позволяет использовать выражение (5) для нахождения тока, требуемого для дальнейших расчётов.

Выбирая одну из двух систем оценок $\hat{U}_n$, полученных со сторон неповреждённых участков, за базовую и доворачивая вторую на требуемый угол ψ , добиваемся их совпадения. На такой же угол необходимо повернуть и соответствующие выбранному участку наблюдаемые токи и напряжения, синхронизируя тем самым регистрируемые величины.

2.5 Общий случай

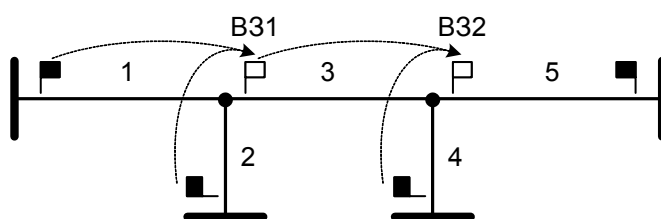


Рис. 6: Схема с многосторонним питанием

В общем случае, когда в схеме более трёх источников питания, следует рассматривать участки двух типов: питающие и внутренние. Питающим называется участок, отходящий от шин системы и, соответственно, имеющий с одной стороны замеры напряжений и токов. По концам же внутреннего участка наблюдение электрических величин невозможно.

На рисунке 6 изображена схема с многосторонним питанием. Значком ■ обозначены реальные устройства, регистрирующие необходимые нам величины, а значком ○ – виртуальные наблюдатели, определяющие благодаря АМО оценки недоступных величин. В данном примере к питающим относятся участки 1, 2, 4 и 5, а к внутренним – участок 3.

Последовательно применяя описанную выше методику, мы находим виртуальные замеры (рисунк 5). Процедура повторяется до тех пор, пока по концам всех отрезков схемы не станут известны величины напряжений и токов (в нашем примере таким участком является пятый).

Далее относительно узлов схема разбивается на трёхлучевые фрагменты. В данном случае их будет два: первый включает участки 1, 2, 3, второй – 3, 4, 5. Применяя критерий (1) к замерам (реальным или виртуальным) по концам каждого трёхлучевого фрагмента, находим повреждённый участок.

Следует понимать, что информация об аварии при пересчёте переносится в виртуальные замеры, т.е. при возникновении короткого замыкания на первом участке информация об этом КЗ будет содержаться и в В31, и в В32. В итоге, результаты поиска повреждённого отрезка в каждом из трёхлучевых фрагментов могут отличаться. Для выявления истинного повреждённого элемента схемы необходимо воспользоваться следующими правилами:

- 1) при возникновении аварии на питающем участке только один из трёхлучевых фрагментов укажет на него;
- 2) при возникновении аварии на внутреннем участке два смежных трёхлучевых фрагмента укажут один и тот же отрезок схемы.

После нахождения повреждённого луча замеры по его концам следует скорректировать, выполнив синхронизацию замеров по описанной в предыдущем пункте методике. Последним этапом выполняется процедура двухстороннего ОМП на найденном участке схемы.

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье описана проблема, с которой сталкиваются дистанционные методы локации в сетях с многосторонним питанием. Предложенный способ её решения основан на использовании такого мощного инструмента современной релейной защиты как алгоритмическое моделирование.

Описанный метод за счёт повышения точности локации позволяет сократить время поиска повреждения в сетях с многосторонним питанием и тем самым повысить надёжность энергоснабжения.

Методы идентификации повреждённого участка, синхронизации замеров по концам лучей питания и, собственно, многостороннего ОМП реализованы как в программных, так и аппаратных средствах определения места повреждения, выпускаемых научно-производственным предприятием «Бреслер».

Получен патент на изобретение Российской Федерации – Способ определения места повреждения разветвленной линии электропередачи с несколькими источниками питания. Решение о выдаче патента на изобретение от 25.05.2012 по заявке № 2010153730 от 27.12.2010..

Описанный метод представляет особую актуальность для малой энергетики.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Павлов А.О. Алгоритмические модели электрических систем. – Труды академии электротехнических наук Чувашской республики, Чебоксары, 1999, № 1-2, с. 10-21.
- [2] Бычков Ю.В., Васильев Д.С., Павлов А.О. Алгоритмические модели на примере защиты дальнего резервирования и определения места повреждения. – Известия высших учебных заведений. Электромеханика, Новочеркасск, 2010, № 6, с. 63-67.
- [3] Аржанников Е.А., Лукоянов В.Ю., Мисриханов М.Ш. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи. – Москва: Энергоатомиздат, 2003.
- [4] Лямец Ю.Я., Ильин В.А. Патент на изобретение № 2107304 Российской Федерации. Способ определения места повреждения ЛЭП с двухсторонним питанием. – Опубликовано 20.03.1998.
- [5] Козлов В.Н., Павлов А.О., Ефимов Е.Б. Определение места повреждения на линиях ФСК ЕЭС. – Релейная защита и автоматика энергосистем: Сборник докладов XX конференции, Москва, 2010, с. 286-290.
- [6] Бычков Ю.В., Павлов А.О. Реализация алгоритма определения места повреждения в микропроцессорном терминале «Бреслер 0107.5X». – Труды академии электротехнических наук Чувашской республики, Чебоксары, 2007, № 2, с. 78-81.
- [7] Козлов В.Н., Павлов А.О., Бычков Ю.В. Аппаратный комплекс двухстороннего ОМП ВЛ. – Релейная защита и автоматика энергосистем: Сборник докладов XX конференции, Москва, 2010, с. 291-295.
- [8] Бычков Ю.В. Определение места повреждения в распределительных сетях. – Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы VI Всерос. научн.-техн. конф. Изд-во Чуваш. ун-та. – Чебоксары. – 2006. – С. 277-280.
- [9] Пивоваров П.Н., Бычков Ю.В. Применение вейвлет-анализа для задач фильтрации цифровых шумов. Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы VI Всерос. научн.-техн. конф. Изд-во Чуваш. ун-та. – Чебоксары. – 2012. – С. 239-240.
- [10] Козлов В.Н., Бычков Ю.В. «Формульные» и «модельные» методы определения места повреждения. – Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы VII Всерос. научн.-техн. конф. Изд-во Чуваш. ун-та. – Чебоксары, 2007. – С. 226-228.

- [11] Козлов В.Н., Бычков Ю.В. Определитель места повреждения «Бреслер-0107.09». – Обмен опытом проектирования, наладки и эксплуатации устройств релейной защиты и автоматики: сб. тезисов XV Уральской научн.-техн. конф. – Екатеринбург. – 2007. – С. 84-86.
- [12] Бычков Ю.В. Применение алгоритмических моделей для решения задач определения места повреждения. – Математические методы в технике и технологиях: сб. трудов XXI междунар. научн. конф. Изд-во Сарат. гос. техн. ун-та. – Саратов. – 2008. – С. 156-158
- [13] Бычков Ю.В. Способ учёта апериодической составляющей при определении места повреждения. Труды академии электротехнических наук Чувашской республики. – 2009. – № 1. – С. 28-33.
- [14] Бычков Ю.В., Павлов А.О. Многостороннее ОМП: проблемы и решения. Релейная защита и автоматизация. – 2012. – № 1. – С. 20-24.