Использование имитационного моделирования для повышения точности волнового определения места повреждения линий электропередачи

Волновое определение места повреждения (ВОМП) линий электропередачи (ЛЭП) широко применяется в зарубежной энергетике [1–5] и начинает внедряться в российские электрические сети (например, [6]). Конструктивные параметры ЛЭП определяют скорость распространения электромагнитных волн, причем неточная оценка скорости распространения электромагнитной волны ведет к появлению ошибок при расчете расстояния ВОМП. Для каждой ЛЭП скорость волны и величины ошибок ВОМП индивидуальны. Целесообразно определять величину возможных погрешностей ВОМП с использованием модели защищаемой ЛЭП, что позволяет провести корректировку оценки расстояния до места повреждения.

Авторы:
Куликов А.Л.,
Ананьев В.В.

МОДЕЛЬ ЛЭП

Аналитические модели позволяют получить решение в виде аналитического выражения. Однако, для сложных объектов невозможно составить аналитическую модель ввиду сложных причинных связей, нелинейностей, случайных параметров, поэтому электроэнергетические объекты целесообразно исследовать на имитационных моделях.

Более совершенной является модель с распределенными параметрами в фазных координатах, а моделирование волновых процессов на ЛЭП целесообразно реализовать в программном комплексе PSCAD.

В качестве примера рассмотрим модель ЛЭП 220 кВ Бобыльская-Кудьма Нижегородской энергосистемы (рис. 1).

Линия представлена участками, характеризуемыми таблицами 1, 2.

Учитывался режим заземления грозотросса вдоль ЛЭП, схема фазировки и реальная загрузка линии.

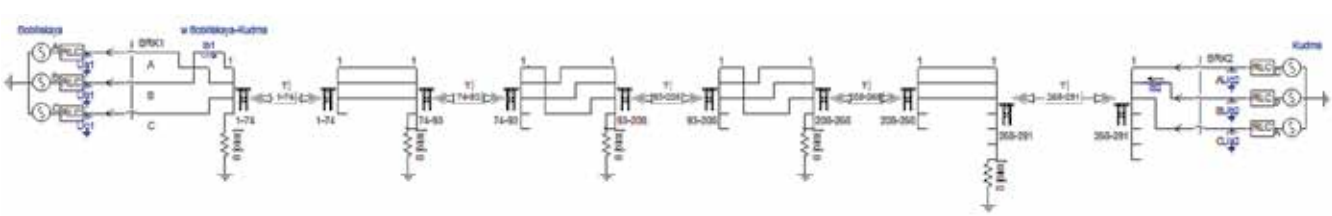


Рис. 1. Модель ЛЭП 220 кВ Бобыльская-Кудьма в программном комплексе PSCAD

ВЫБОР ПОРОГА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ

Регистрацию времени прихода волны, как правило, производят по пороговому (уставочному) значению. Выбор значения порога существенно сказывается на точности ВОМП. Для выбора более низкого порогового значения используется полосовой фильтр [3]. Нижнее значение полосы фильтра находится в килогерцовом диапазоне, что позволяет исключить промышленную частоту и неинформативные гармонические составляющие сигнала (в имитационной модели на частоте 100 кГц обеспечивается наибольшее отношение сигнал/шум). Верхний диапазон установлен на частоте 1 МГц, что соответствует полосе ВЧ-присоединения ЛЭП. Отношение сигнал/шум по каналу напряжения составляет 1:100, а по каналу тока – от 1:7 до 1:2. Для экспериментов с имитационной моделью с целью использования более низкого порогового значения был выбран канал напряжения.

На амплитуду волны напряжения влияет сопротивление и величина тока в точке повреждения, а также сопротивление системы и геометрия опор. Задаваясь разными значениями указанных параметров, определялся диапазон амплитудных значений импульса напряжения при КЗ (таблица 3).

В последней строке таблицы 3 приведена минимальная величина формируемых импульсов при трехфазных КЗ на анализируемой линии. Аналогичные результаты получены при других видах замыканий (таблица 4).

По результатам моделирования отмечено, что амплитуды волн при КЗ соизмеримы с коммутационными перенапряжениями. Поэтому для волновой релейной защиты необходимо принятие специальных мер для исключения соответствующих ложных срабатываний.

Исходя из экспериментов по имитационному моделированию волновых процессов на исследуемой ЛЭП, были заданы следующие пороговые значения: 25 кВ – со стороны ПС Бобыльская, 30 кВ – со стороны ПС Кудьма.

Таблица 1. Характеристики участков

Номер участка	Длинна участка, км	Марка провода	Марка грозотроса	Тип опоры	Стрела провеса, м	Сопротивление грунта
1	19,55	АСО-400	С-70	ПБ 220-4	8	100
2	7,74	АСО-400	2×С-70	П 21	8	100
3	46,83	АСО-400	2×С-70	П 21	8	500
4	23,70	АСО-400	2×С-70	П 21	8	40
5	6,95	АСО-400	С-70	П 220-2	8	50

Таблица 2. Расчетные параметры участков

Номер участка	Удельные сопротивления на частоте 50 Гц, Ом		Удельная проводимость на частоте 50 Гц, мкСм		Скорость электромагнитной волны, км/с
	Собственное	Взаимное	Собственная	Взаимная	
1	0,123+0,736*j*	0,048+0,302*j* (0,048+0,320*j*)	2,39*j* (2,50*j*)	-0,31*j* (-0,45*j*)	298930
2	0,122+0,737*j*	0,047+0,263*j* (0,047+0,306*j*)	2,31*j* (2,38*j*)	-0,21*j* (-0,45*j*)	297807
3	0,124+0,786*j*	0,048+0,312*j* (0,048+0,355*j*)	2,31*j* (2,38*j*)	-0,21*j* (-0,45*j*)	299227
4	0,121+0,709*j*	0,046+0,235*j* (0,046+0,279*j*)	2,31*j* (2,38*j*)	-0,21*j* (-0,45*j*)	299028
5	0,119+0,716*j* (0,119+0,718*j*)	0,045+0,251*j* (0,046+0,291*j*)	2,25*j* (2,38*j*)	-0,26*j* (-0,52*j*)	297473

Таблица 3. Амплитуда импульса при разных условиях трехфазного КЗ

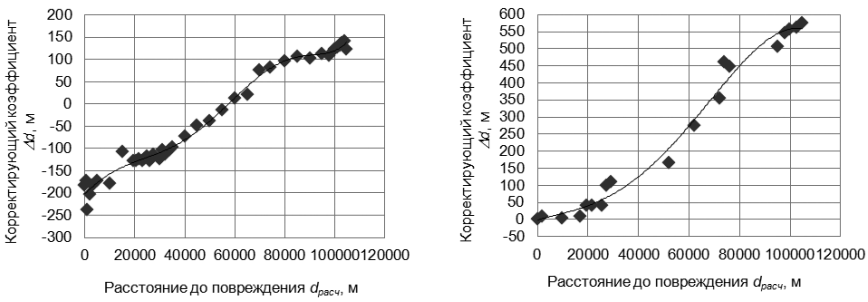
Расстояние до повреждения от ПС Бобыльская, % длины линии	Мгновенное значение тока в момент повреждения в фазе В, А	Сопротивление повреждения, Ом	Амплитуда импульса напряжения на ПС Бобыльская, кВ	Амплитуда импульса напряжения на ПС Кудьма, кВ
20	0	50	70	50
20	0	1	90	62
20	550	50	200	130
20	550	1	250	170
75	0	50	60	80
75	0	1	80	110
75	550	50	110	120
75	550	1	140	145
98	0	50	43	100
98	0	1	53	127
98	550	50	110	260
98	550	1	150	330
Итого	Максимальный импульс, кВ		250	330
	Гарантируемый импульс, кВ		43	62

Таблица 4. Минимальные импульсы при различных КЗ

Вид короткого замыкания	Импульса напряжения на ПС Бобыльская, кВ	Импульса напряжения на ПС Кудьма, кВ
Трехфазное	43	62
Двухфазное на землю	30	32
Двухфазное	25	30
Однофазное	2,5	8,5

КУЛИКОВ А.Л., д.т.н., профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

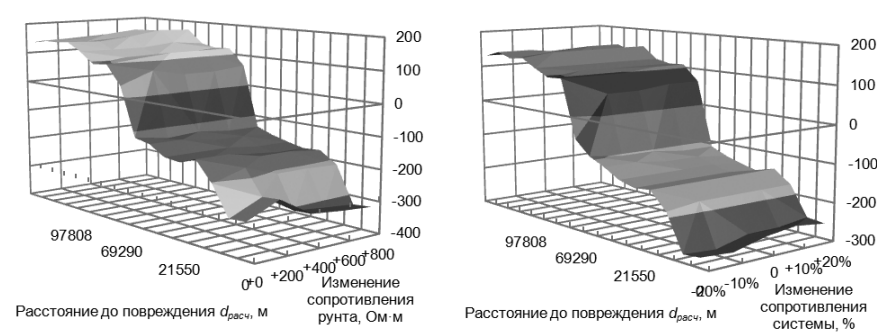
АНАНЬЕВ В.В., аспирант кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева



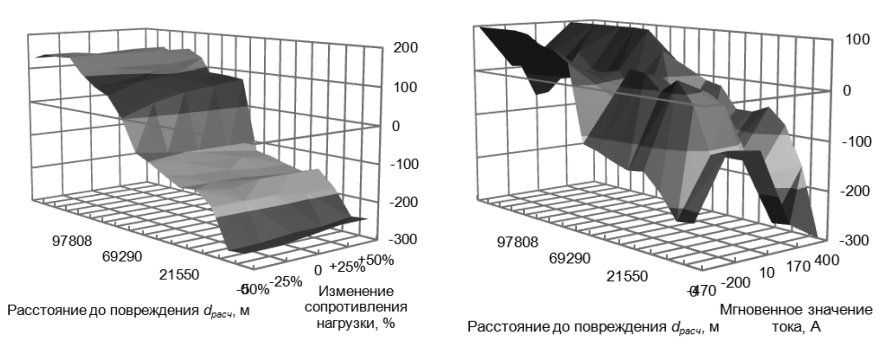
а) б)

Рис. 2. Зависимость корректирующего коэффициента оценки места повреждения на линии 220 кВ Бобыльская-Кудьма Нижегородской энергосистемы: а) для двухстороннего ВОМП, б) для одностороннего ВОМП

а) б)



в) г)



д) е)

Рис. 3. Зависимость корректирующего коэффициента от: а) величины стрелы провеса, б) удельного активного сопротивления провода, в) сопротивления грунта, г) сопротивления системы, д) нагрузки, е) от мгновенного значения тока со стороны ПС Бобыльская

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ВОМП ЛЭП С ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Сопоставление оценок расстояний с моделируемым расстоянием до места повреждения позволяет вычислить ошибку оценки, которая будет зависеть от места повреждения. В результате при определении расстояния до повреждения на ЛЭП вводится коррекция:

$$d = d_{расч} + \Delta d(d_{расч}) \qquad (1)$$

где $d_{расч}$ – расчетное расстояние до места повреждения;

d – истинное расстояние до места повреждения.

Рис. 2(а) отображает зависимость необходимых корректировок от места повреждения для двустороннего ВОМП на линии 220 кВ Бобыльская-Кудьма Нижегородской энергосистемы. Максимальная погрешность двухстороннего метода достигает 250 м. Однако погрешность оценки расстояния по двухстороннему методу может принимать как положительное, так и отрицательное значение в зависимости от того в какой половине линии произошло повреждение. Рис. 2(б) иллюстрирует зависимость аналогичных корректировок для одностороннего ВОМП на этой же линии.

Следует отметить ряд особенностей, влияющих на точностные характеристики ВОМП и реализацию такого адаптивного подхода:

- сопротивление и вид повреждения не влияют на время распространения сигналов по ЛЭП;
- на амплитуду напряжения и скорость затухания сигналов влияют сопротивление в точке повреждения, сопротивление системы и геометрия опор;
- амплитуда перенапряжения зависит от величины тока в точке повреждения в момент КЗ.

В ходе имитационных экспериментов проводился анализ влияния различных факторов на скорость распространения электромагнитных волн по ЛЭП, а также ошибки ВОМП.

Факторы могут быть разделены на две группы:

- неэлектрические (конструктивные), например, габариты ЛЭП;
- электрические: изменения сопротивления грунта, провода и т.д., а также токи и напряжения.

При эксплуатации ЛЭП, как правило, изменяется только один габаритный параметр – стрела провеса. Рис. 3(а) отображает зависимость корректирующих коэффициентов при разных значениях стрелы провеса. Следует отметить, что неучет этого параметра при расчетах ВОМП приводит к ошибкам до 150 м. Стрела провеса изменяется с колебаниями температуры провода. Температура соотносится с величиной тока в проводе, а также текущими погодными условиями: температура воздуха, ветер, солнечное излучение и др. Известны методы, позволяющие вычислить значение температуры провода с точностью 5–10 °С. Учитывая марку и температуру провода, а также длину пролета, можно оценить его стрелу провеса в пролете ЛЭП.

Изменение температуры провода приводит к изменению его удельного активного сопротивления, которое влияет на скорость распространения и затухания электромагнитной волны. Задаваясь диапазоном рабочих температур провода, например, марки АС от –20 °С до 70 °С, оценены возможные ошибки ВОМП, которые могут достигать 30 м (рис. 3(б). Изменение влажности грунта вызывает более значительные ошибки до 80 м (рис. 3 (в).

Исследуемая ЛЭП является линией с односторонним питанием. Игнорирование изменений эквивалентного сопротивления системы приводит к ошибкам ВОМП, составляющим 20–30 м (рис. 3 (г). Аналогичные ошибки возможны при неучете колебаний эквивалентного сопротивления нагрузки (рис. 3 (д).

Мгновенное значение фазного тока непосредственно перед повреждением оказывает наиболее существенный вклад в степень точности оценки расстояния до повреждения. Величина ошибок для исследуемой линии может достигать 200 и более метров (рис. 3 (е).

Таким образом, по результатам имитационного моделирования ЛЭП отмечены следующие основные факторы, определяющие точность ВОМП:

- стрела провеса, зависящая от температуры провода;
- сопротивление грунта, которое может быть оценено на основе табличных данных по измерениям влажности;
- мгновенное значение фазного тока перед натуплением повреждения.

При технической реализации адаптивного ВОМП целесообразно получить совокупность зависимостей корректирующих коэффициентов по всем факторам, влияющим на точность оценки расстояния, и хранить в памяти устройства, реализующего расчетные операции. Имея средства оценки значений влияющих факторов (температура провода, влажность воздуха, мгновенное значение тока и др.), целесообразно осуществлять выборку из памяти корректирующего коэффициента, соответствующего измеренным значениям факторов, для уточнения расстояния до повреждения ЛЭП.

Такое техническое решение позволит обеспечить высокую точность ВОМП, адаптированного к особенностям исполнения и режимов работы конкретной ЛЭП, путем применения имитационных моделей.

ВЫВОДЫ

1. Расчетные соотношения ВОМП предполагают однородность параметров ЛЭП. Изменения скорости распространения электромагнитных волн зависят от конструктивных особенностей и параметров отдельных участков протяженных ЛЭП могут приводить к значительным ошибкам.

2. Имитационное моделирование ВОМП на ЛЭП 220 кВ Бобыльская-Кудьма Нижегородской энергосистемы показало, что неучет реальной скорости распространения электромагнитной волны по линии приводит к ошибкам: для двухстороннего метода 250 м., а для одностороннего – 600 м.

3. Произведен анализ факторов, влияющих на ошибки ВОМП, на примере ЛЭП 220 кВ Бобыльская-Кудьма Нижегородской энергосистемы. Наиболее существенными факторами являются: стрела провеса (ошибки до 150 м.), сопротивление грунта (ошибки до 80 м.), мгновенное значение тока, зафиксированное перед повреждением (ошибки до 300 м.).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Lin S., He Z.Y., Li X.P., Qian Q.Q.* Travelling wave time-frequency characteristic-based fault location method for transmission lines // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2012. – № 6 с. 764–772.

2. *Yi-ning Z., Yong-hao L., Min X., Zexiang C.* A novel algorithm for HVDC line fault location based on variant travelling wave speed // Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT) – 2011. – с. 1459–1463 .

3. *Xiangjun Z., Li K. K., Zhengyi L., Xianggen Y., Xiangun Z.* Fault location using traveling wave for power networks in Industry Applications Conference – 2004. – № 4 – с. 2426–2429.

4. *Deng F., Zeng X., Bo Z., Ma S., Zhou S.* An improved network-based traveling wave fault location method // Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). – 2011. – с. 1–4;

5. *Morched A., Gustavsen B., Tartibi M.* A Universal Line Model for Accurate Calculation of Electromagnetic Transients on Overhead Lines and Cables // Paper PE-112-PWRD-0-11 – 1997.

6. Места повреждения на уральских ЛЭП обнаружат волновым методом // Энергетика и промышленность России, № 11 (247) июнь 2014.