

НОВЫЙ СПОСОБ ОДНОСТОРОННЕГО ВОЛНОВОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ

Фёдоров А.О., ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия

Петров В.С., Чувашский государственный университет
им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия

Ивахно Д.О., Чувашский государственный университет
им. И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

***Аннотация.** В статье предложен новый способ одностороннего волнового определения места повреждения линии электропередачи, свободный от недостатка традиционных способов: необходимости распознавания волны, отраженной от места короткого замыкания. Это преимущество достигается путем непосредственного сравнения измеренного сигнала переходного процесса с его оценкой, найденной для предполагаемого места повреждения в модели электрической сети аварийного режима. Сравнение ведется с использованием алгоритма динамической трансформации временной шкалы, нивелирующей погрешности модели электрической сети аварийного режима. За место повреждения принимается предполагаемое место повреждения, оценка сигнала переходного процесса для которого идентична измеренному сигналу.*

***Ключевые слова:** одностороннее волновое определение места повреждения, динамическая трансформация временной шкалы.*

Введение

Сегодня методы волнового определения места повреждения линии электропередачи (ЛЭП) набирают всё большую популярность. Это связано с тем, что аварийный режим ими анализируется на невероятно коротком промежутке времени, в течение которого высоковольтные трансформаторы тока не успевают перейти в режим насыщения [1]. Это преимущество закладывает в односторонние волновые методы большой потенциал для прецизионной локализации повреждений на ЛЭП. Однако для реализации этого потенциала в сигнале переходного процесса необходимо правильно распознать две волны: первичную волну с контролируемой ЛЭП и волну, отраженную от повреждения [2]. Тогда расстояние до места повреждения можно определить по простой формуле

$$\hat{x}_f = \frac{t_{sw} - t_{fw}}{2} v, \quad (1)$$

где v – скорость распространения волны в ЛЭП, а t_{fw} и t_{sw} – моменты возникновения первичной волны с контролируемой ЛЭП и волны, отраженной от места повреждения.

Распознавание волны, отраженной от места повреждения, осложнено тем, что в течение переходного процесса в месте измерений возникает множество других волн, порожденных в результате отражений от различных неоднородностей электрической сети.

Целью настоящей работы является разработка способа одностороннего волнового определения места повреждения, свободного от недостатка традиционных подходов: необходимости распознавания волны, отраженной от места короткого замыкания.

Идея предлагаемого алгоритма

В предлагаемом способе в модели электрической сети аварийного режима оцениваются величины фронтов волн и моменты их возникновения в месте установки устройства для каждого предполагаемого места повреждения, и на их основе оценивается сигнал переходного процесса (рис. 1). Для упрощения расчетов в модели электрической сети аварийного режима не учитываются потери в ЛЭП. В связи с чем оценка сигнала несколько отличается от измеренного сигнала переходного процесса. Нивелировать указанное отличие предлагается при помощи алгоритма динамической трансформации временной шкалы, адаптивно сопоставляющего идентичные сегменты сравниваемых сигналов. Место повреждения при этом определяется по наиболее точному соответствию измеренного сигнала переходного процесса и его оценки.

Методика оценки величин фронтов волн и моментов их возникновения в месте установки устройства волнового ОМП подробно изложена в [2] – [4].

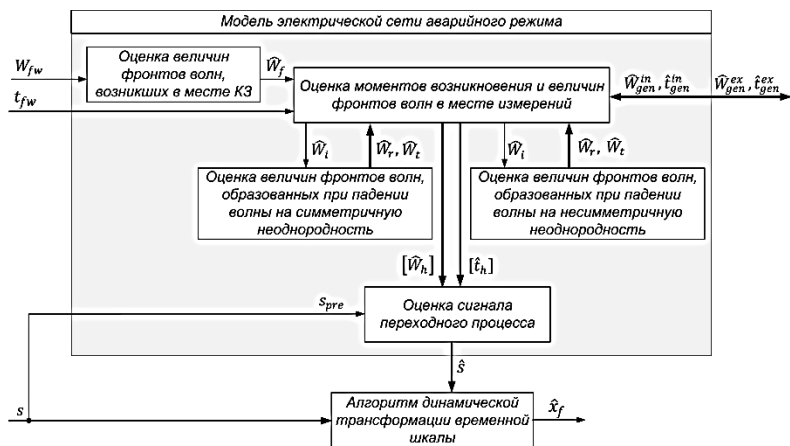


Рис. 1. Структурная схема¹ предлагаемого способа одностороннего волнового ОМП

Оценка сигнала переходного процесса

С помощью модели электрической сети аварийного режима формируют оценки величин фронтов волн $[\hat{W}_h]$ и моментов их возникновения $[\hat{t}_h]$ в месте установки устройства в течение удвоенного времени пробега T_w волной всей ЛЭП. На их основе и с использованием предаварийного мгновенного значения s_{pre} оценивается сигнал переходного процесса \hat{s} (рис. 2), который сравнивается с измерением устройства при помощи алгоритма динамической трансформации временной шкалы.

¹ На рис. 1 используются следующие обозначения: W_{fw} – величина фронта первичной измеренной волны с контролируемой ЛЭП, s_{pre} – предаварийное значение измеренного сигнала; \bar{W}_f – величина фронта волны, возникшей в месте КЗ, $\bar{W}_l, \bar{W}_r, \bar{W}_t$ – оценки величин фронтов падающей, отраженной и преломленной волн, $\bar{W}_{gen}^{ex}, \bar{W}_{gen}^{in}, \bar{t}_{gen}^{ex}, \bar{t}_{gen}^{in}$ – оценки величин фронтов волн и времен их возникновения, образованных в волновых каналах в результате их взаимного влияния, $[\bar{W}_h], [\bar{t}_h]$ – оценки величин фронтов волн и моментов их возникновения в месте измерений, сформированные с использованием модели электрической сети аварийного режима; s и \hat{s} – измеренный сигнал переходного процесса и его оценка.

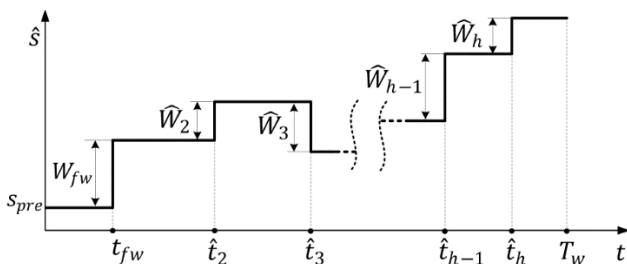


Рис. 2. Оценка сигнала переходного процесса \hat{s} , сформированная в модели электрической сети аварийного режима

Алгоритм динамической трансформации временной шкалы

Алгоритм динамической трансформации временной шкалы (англ.-dynamic time warping, DTW) позволяет оценить степень соответствия между двумя сигналами, схожими по форме, но деформированными по оси времени [5].

Алгоритм DTW выравнивает измеренный сигнал переходного процесса s и его оценку \hat{s} по времени относительно друг друга и характеризует степень их сходства. С этой целью на первом этапе строится матрица расстояний, элементы которой равны модулю разности между каждым отсчетом измеренного сигнала s и его оценкой \hat{s} :

$$d(m, n) = |s(m) - \hat{s}(n)|, \quad m = \overline{1, q}, \quad n = \overline{1, q},$$

где q – количество отсчетов.

После этого строится матрица деформации, элементы которой определяются на основе матрицы расстояний [6]:

$$D(m, n) = \begin{cases} \sum_{k=1}^m d(k, 1), & \text{если } n = 1, \\ \sum_{k=1}^n d(1, k), & \text{если } m = 1, \\ d(m, n) + \min [D(m-1, n-1), D(m-1, n), D(m, n-1)]. & \end{cases}$$

Матрица деформации служит для определения соответствия сегментов сигналов s и \hat{s} . Соответствующие друг другу отсче-

ты сегментов формируют так называемый путь деформации w_e . После чего степень сходства сигналов определяется из целевой функции

$$DTW(s, \hat{s}) = \min \left(\frac{\sum_{e=1}^P d(w_e)}{P} \right), \quad (2)$$

где P – длина пути деформации.

Для каждого предполагаемого места повреждения x_s находится значение целевой функции $DTW(s, \hat{s})$ (2) и за истинное принимается то из них, которое характеризуется наименьшим значением целевой функции $DTW(s, \hat{s})$.

Выводы

В работе показано, что определение места повреждения односторонним волновым методом может осуществляться без распознавания волны, отраженной от места повреждения. С этой целью в модели электрической сети аварийного режима оценивается сигнал переходного процесса и сравнивается с сигналом, измеренным устройством, с помощью алгоритма динамической трансформации временной шкалы. За место повреждения принимается предполагаемое место повреждения, оценка сигнала переходного процесса для которого идентична измеренному сигналу.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Fedorov, V. Petrov, O. Afanasieva and I. Zlobina Limitations of Traveling Wave Fault Location // 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC) / Ekaterinburg, Russia, 2020, pp. 21-25, doi: 10.1109/USEC50097.2020.9281153.

2. A. Fedorov, V. Petrov, V. Naumov and V. Hristoforov Theory of Single-end Traveling Wave Fault Location // 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2021, pp. 68-74, doi: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446310.

3. Фёдоров А.О., Петров В.С., Христофоров В.А. Особенности построения модели электрической сети аварийного режима в одностороннем методе волнового определения места повреждения линии электропередачи // Вестник Чувашского университета. – 2021. – № 3. – С. 133–139. DOI: 10.47026/1810-1909-2021-3-133-139.

4. Фёдоров А.О., Петров В.С., Христофоров В.А. «Особенности оценки фронтов волн в задачах одностороннего волнового определения места повреждения линии электропередачи», Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции Динамика нелинейных дискретных электротехнических систем ДНДС-2021, Чебоксары, 2021. С. 379–383.

5. R. Deller, H. Hansen, G. Proakis Discrete-Time Processing of speech signals, 1993, 908 p.

6. Y. Wang, P. Lei, H. Zhou, X. Wang, M. Ma and X. Chen Using DTW to measure trajectory distance in grid space // 2014 4th IEEE International Conference on Information Science and Technology, 2014, pp. 152–155.

Авторы:

Фёдоров Алексей Олегович, инженер-исследователь 3 кат. департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА». Окончил в 2020 г. факультет энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова, получил степень магистра по направлению «Электроэнергетические системы, сети, электропередачи, их режимы, устойчивость и надежность». E-mail: fedorov_a@ekra.ru.

Петров Владимир Сергеевич, руководитель группы научного сопровождения внешних НИОКР департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА», доцент кафедры теоретических основ электротехники и релейной защиты и автоматики ЧГУ им. И.Н. Ульянова. Окончил в 2010 г. электроэнергетический факультет ЧГУ им. И.Н. Ульянова. В 2015 г. защитил в Чувашском государственном университете имени И.Н. Ульянова кандидатскую диссертацию «Цифровая система автоматического ограничения повышения напряжения сетей 110-750 кВ». E-mail: petrov_vs@ekra.ru.

Ивахно Дмитрий Олегович, студент факультета энергетики и электротехники ЧГУ им. И.Н. Ульянова, техник департамента автоматизации энергосистем ООО НПП «ЭКРА». E-mail: ivahno_do@ekra.ru.