

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

**ДИНАМИКА
НЕЛИНЕЙНЫХ
ДИСКРЕТНЫХ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ
И ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ**

**Материалы
XIV Всероссийской научно-технической
конференции**

ДНДС–2021

Чебоксары
2021

УДК 621.3:004(063)

ББК 381:321Я73

Д44

Редакционная коллегия:

ректор, канд. экон. наук, доцент *А.Ю. Александров*;

д-р техн. наук, профессор *Г.А. Белов*;

канд. техн. наук, доцент *А.В. Серебрянников*

Печатается по решению Ученого совета

Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова

Динамика нелинейных дискретных электротехнических
Д44 и электронных систем: материалы XIV Всерос. науч.-техн.
конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2021. 536 с.

ISBN 978-5-7677-3286-9

Рассматриваются вопросы математических основ и математического моделирования нелинейных дискретных систем, цифровой обработки сигналов, построения и анализа устройств и систем силовой электроники, систем электроэнергетики и электропривода.

Для научных работников, инженеров, менеджеров и студентов старших курсов.

УДК 621.3:004(063)

ББК 381:321Я73

© Издательство

Чувашского университета, 2021

ISBN 978-5-7677-3286-9

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА

Фёдоров Алексей О., Петров В.С., Христофоров В.А.
(Чебоксары, ЧГУ, ООО «НПП ЭКРА»)

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ФРОНТОВ ВОЛН В ЗАДАЧАХ ОДНОСТОРОННЕГО ВОЛНОВОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Для определения места повреждения (ОМП) в односторонних волновых методах идентифицируют среди всех фронтов волн, возникших в месте измерений, фронт волны, время возникновения которого определяется положением короткого замыкания (КЗ) на линии электропередачи (ЛЭП) (далее – рабочий фронт волны) [1]. Для этого строятся модели электрической сети аварийного режима (ЭСАР). Из всех моделей выбирается та, которая позволяет сформировать оценки значений фронтов волн и времен их возникновения, наиболее близки к значениям фронтов волн и временам их возникновения, определенным по измерениям [2]. На основе выбранной модели ЭСАР идентифицируют рабочий фронт волны и определяют место КЗ. Из вышеизложенного следует, что точность и устойчивость функционирования устройства, реализующего односторонний метод волнового ОМП, напрямую зависит от правильности построения модели ЭСАР.

В модели ЭСАР времена возникновения фронтов волн в месте измерений могут быть оценены при известной скорости распространения волны в волновом канале и пути, пройденного ею от места КЗ [2, 3].

В настоящей работе с использованием модели ЭСАР иллюстрируются особенности оценки фронтов волн, возникающие при одностороннем волновом ОМП. Анализ проводится с использованием составляющих волновых каналов, являющихся контролируемой величиной волнового ОМП [5].

Так как трехфазное и двухфазное КЗ на землю развиваются из однофазного или двухфазного КЗ [6], то в данной работе они не рассматриваются.

Однофазное КЗ. Так как для фазных напряжений u_j , $J = A, B, C$ симметричной ЛЭП справедливо:

$$\begin{pmatrix} \hat{e}^{u_A} \\ \hat{e}^{u_B} \\ \hat{e}^{u_C} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -1/2 & 1 & 1 \\ -1/2 & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{e}^{u_\alpha} \\ \hat{e}^{u_\beta} \\ \hat{e}^{u_0} \end{pmatrix} \quad (1)$$

где u_α , u_β , u_0 – составляющие двух междуфазных и нулевого волновых каналов, и при однофазном КЗ $u_\beta = 0$, то для напряжений $u_{f,j}$ в месте однофазного КЗ (в качестве примера рассмотрим КЗ фазы A) можно записать:

$$u_{f,A} = u_{i,\alpha} + u_{i,0} + u_{r,\alpha} + u_{r,0}, \quad (2)$$

$$u_{f,B} = u_{f,C} = -\frac{1}{2}u_{i,\alpha} + u_{i,0} - \frac{1}{2}u_{r,\alpha} + u_{r,0}, \quad (3)$$

а для токов:

$$\frac{u_{i,\alpha}}{z_{l,\alpha}} + \frac{u_{i,0}}{z_{l,0}} - \frac{u_{r,\alpha}}{z_{l,\alpha}} - \frac{u_{r,0}}{z_{l,0}} = i_{f,A} + i_{t,\alpha} + i_{t,0}, \quad (4)$$

$$-\frac{u_{i,\alpha}}{2z_{l,\alpha}} + \frac{u_{i,0}}{z_{l,0}} + \frac{u_{r,\alpha}}{2z_{l,\alpha}} - \frac{u_{r,0}}{z_{l,0}} = -\frac{i_{t,\alpha}}{2} + i_{t,0}, \quad (5)$$

где $u_{i,\alpha}, u_{i,0}, u_{r,\alpha}, u_{r,0}$ – значения фронтов падающих и отраженных волн напряжения в междуфазном α - и нулевом волновом канале соответственно; $z_{l,\alpha}, z_{l,0}$ – волновое сопротивление ЛЭП междуфазного α - и нулевого волнового канала соответственно; $i_{f,A}$ – значение фронта волны тока КЗ; $i_{t,\alpha}, i_{t,0}$ – значения фронтов преломленных через место КЗ волн тока в междуфазном α - и нулевом волновом канале соответственно.

Кроме того справедливо:

$$u_{f,A} = i_{f,A} R_f = i_{t,\alpha} z_{l,\alpha} + i_{t,0} z_{l,0}, \quad (6)$$

$$u_{f,B} = u_{f,C} = -\frac{1}{2}i_{t,\alpha} z_{l,\alpha} + i_{t,0} z_{l,0}, \quad (7)$$

где R_f – сопротивление в месте КЗ.

Из совместно решения (2)–(7) следует, что:

$$\begin{cases} u_{r,\alpha} = - \frac{2z_{l,\alpha}}{2z_{l,\alpha} + z_{l,0} + 6R_f} u_{i,\alpha} + u_{gen,\alpha}; \\ u_{r,0} = - \frac{z_{l,0}}{2z_{l,\alpha} + z_{l,0} + 6R_f} u_{i,0} + u_{gen,0}, \end{cases} \quad (1)$$

где $u_{gen,\alpha} = - \frac{2z_{l,\alpha}}{2z_{l,\alpha} + z_{l,0} + 6R_f} u_{i,0}$ – значение фронта волны напряжения, возникшей в α -канале при падении на место КЗ волны в нулевом канале; $u_{gen,0} = - \frac{z_{l,0}}{2z_{l,\alpha} + z_{l,0} + 6R_f} u_{i,\alpha}$ – значение фронта волны напряжения, возникшей в нулевом канале при падении на место КЗ волны в α -канале.

В связи с тем, что волны в каналах распространяются с разной скоростью, падать на место КЗ они будут в разное время. Следовательно, процесс образования новых волн в результате их падения на место КЗ нужно рассматривать для каждой падающей волны отдельно. Значения фронтов преломленных волн напряжения могут быть найдены по известным выражениям

$$u_{t,\alpha} = u_{i,\alpha} + u_{r,\alpha}, \quad (2)$$

$$u_{t,0} = u_{i,0} + u_{r,0}. \quad (3)$$

Значения фронтов отраженных и преломленных волн тока в α - и нулевом волновых каналах могут быть найдены с учетом известных соотношений:

$$i_\alpha = \frac{u_\alpha}{z_{l,\alpha}}, \quad (4)$$

$$i_0 = \frac{u_0}{z_{l,0}}. \quad (5)$$

где $u_\alpha = u_{r,\alpha}, u_{t,\alpha}$, $u_0 = u_{r,0}, u_{t,0}$.

Двухфазное КЗ. Так как при двухфазном КЗ (в качестве примера рассмотрим КЗ фаз В и С) волны распространяются только в поврежденных фазах и $u_\alpha = u_0 = 0$, то с учетом (1) для напряжений $u_{f,\lambda}$ в месте двухфазного КЗ можно записать

$$u_{f,B} = -u_{f,C} = u_{i,\beta} + u_{r,\beta}, \quad (6)$$

а для токов

$$\frac{u_{i,\beta}}{z_{l,\beta}} - \frac{u_{r,\beta}}{z_{l,\beta}} = i_f + i_{t,\beta}, \quad (7)$$

Кроме того справедливо

$$u_{f,B} - u_{f,C} = i_f R_f, \quad (8)$$

$$u_{f,B} = -u_{f,C} = i_{t,\beta} z_{l,\beta} \quad (9)$$

Совместное решение (6)–(9) позволяет определить отраженную волну напряжения

$$u_{r,\beta} = - \frac{z_{l,\beta}}{R_f + z_{l,\beta}} u_{i,\beta}. \quad (10)$$

Тогда преломленная волна напряжения

$$u_{t,\beta} = \frac{R_f}{R_f + z_{l,\beta}} u_{i,\beta}. \quad (11)$$

Отраженные и преломленные волны тока могут быть определены по (4).

Из (11) видно, что то при $R_f = 0$ через место двухфазного КЗ волны не преломляются. В связи с чем модель ЭСАР должна быть разделена относительно места КЗ на две независимые части и взята только та из них, которая содержит место измерений. Это позволяет снизить количество оценок фоновых волн и, следовательно, упростить задачу идентификации рабочей волны.

Выводы. В работе показано, что успешная идентификация волны, отраженной от места КЗ, требует учета в модели ЭСАР вида КЗ и его сопротивления. Так при однофазном КЗ необходимо учитывать возможность порождения составляющих в одном волновом канале под воздействием составляющих другого волнового канала. При металлическом двухфазном КЗ модель ЭСАР режима должна быть разделена относительно места КЗ на две независимые части и взята только та из них, которая содержит место измерений. Это позволяет снизить количество оценок фоновых волн и, следовательно, упростить задачу идентификации волны, отраженной от места КЗ.

Литература

1. Locating faults by the traveling waves they launch / E. O. Schweitzer [et al.] // 67th Annual Conference for Protective Relay Engineers. 2014. College Station, TX, USA. 2014. PP. 95–110.
2. Theory of single-end traveling wave fault location / A. Fedorov [et al.] // 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia. 2021. PP. 1–5.
3. Accurate and economical traveling-wave fault locating without communications / A. Guzmán [et al.] // 2018 71st Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE), College Station, TX. 2018. PP. 1–18.
4. Попов И. Н., Лачугин В. Ф., Соколова Г. В. Релейная защита, основанная на контроле переходных процессов. М.: Энергоатомиздат, 1986.
5. Alekseev V., Petrov V., Naumov V. Invariance of Modal Transformations of Electrical Values in Traveling Wave Fault Locator // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia. 2020. PP. 1–5.
6. Чернобровов Н. В. Релейная защита. М.: Энергия, 1971.

Аркадьев Д.Э., Фёдоров А.О., Петров В.С.
(Чебоксары, ЧГУ, ООО НПП «ЭКРА»)

СПОСОБ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОВРЕЖДЕНИЙ ДВУХСТОРОННИМ ВОЛНОВЫМ МЕТОДОМ НА КАБЕЛЬНО-ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Расчет места повреждения \hat{m} двухсторонним волновым методом [1] на однородной ЛЭП базируется на неизменности скорости движения фронта волны v на всем контролируемом участке длиной L :

$$\hat{m} = \frac{1}{2} \hat{e}L + (\hat{t}_1 - \hat{t}_2)v \hat{d}, \quad (1)$$

где \hat{t}_1 и \hat{t}_2 – оценки времен возникновения фронтов волн на концах контролируемой ЛЭП.