

* * *

Новый принцип осуществления токовой дифференциальной защиты для линий электропередачи ультравысокого напряжения

ХО ДЯ-ЛИ, ЛИ ЮН-ЛИ, ЛИ-БИН, СЮЕ ШИ-МИН

Поперечные емкостные токи сильно влияют на работу токовой дифференциальной защиты линий электропередачи сверхвысоких напряжений. Предлагается новый принцип выполнения защиты и определение тока короткого замыкания при использовании модели Бержерона (Begeron Model) линий электропередачи, которая автоматически учитывает емкостные токи и исключает их влияние на работу защиты. Приведены формулы модели Бержерона и выполнено цифровое моделирование работы измерительного органа защиты. Результаты моделирования и опыт эксплуатации показывают возможность и преимущества этого принципа. Токовые дифференциальные защиты на этом принципе с помощью оптико-волоконного канала успешно работают уже 4 года на первой в Китае линии электропередачи напряжением 1000 кВ.

Ключевые слова: линии электропередачи, релейная защита, модель Бержерона (Begeron model)

Как известно, токовая дифференциальная защита имеет абсолютную селективность и является идеальной основной защитой для линий электропередачи [1]. Однако большие поперечные емкостные токи линий передачи сверхвысоких напряжений сильно искажают токи короткого замыкания (КЗ) и влияют на работу этой защиты [2]. В статье рассматривается эта проблема и предлагается новый принцип выполнения защиты, который заключается в том, что на защищаемой линии электропередачи выбирается одна точка, вычисляются токи, притекающие к этой точке с двух сторон линии, с помощью модели Бержерона (Begeron Model) [3] линии передачи с распределенными па-

раметрами. При нормальной эксплуатации линии передачи и при внешних КЗ токи, притекающие к этой точке с двух сторон линии электропередачи, будут равны по амплитуде и противоположны по фазе: их сумма равна нулю, и защита не будет работать. Однако в случае внутренних КЗ «Бержерон модель» линии разрушается и вычисленные по модели Бержерона токи, притекающие с двух сторон к точке рассмотрения, не будут равны по амплитуде и противоположны по фазе, т.е. сумма их не будет равна нулю, и защита работает и отключает линию с двух сторон (рис. 1). Так как токи, вычисленные с помощью модели, автоматически содержали в себе емкостные токи, то на работу защиты

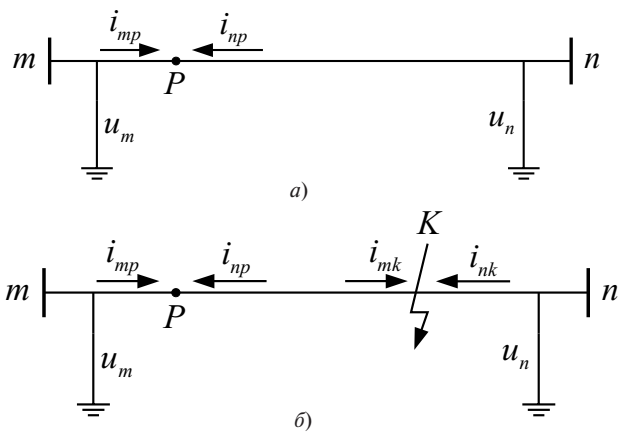


Рис. 1. Схема линии электропередачи без внутреннего повреждения (а) и с внутренним повреждением (б)

они не будут оказывать влияния. Это является существенным преимуществом этого принципа.

По сути модель Бержерона разделяет линию на две части (две стороны) и токи в волновых процессах определяются на двух сторонах отдельно (рис. 2).

Принцип действия модели линии электропередачи Бержерона. Линия с распределенными параметрами может быть описана дифференциальными уравнениями:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x} &= R_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t}; \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= G_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t}. \end{aligned} \quad (1)$$

Если пренебречь сравнительно небольшими проводимостью G_0 и активным сопротивлением R_0 , то получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} &= -L_0 \frac{\partial i}{\partial t}; \\ \frac{\partial i}{\partial x} &= -C_0 \frac{\partial u}{\partial t}. \end{aligned} \quad (2)$$

Дифференцируя (2) по x и t , после замены и упрощения получаем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} &= \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial^2 i}{\partial x^2} &= \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 i}{\partial t^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $v = 1/\sqrt{L_0 C_0}$ – скорость распространения волны тока и напряжения по линии, которая приблизительно равняется скорости света в вакууме.

Решения дифференциальных уравнений (3) для линии «провод–земля»:

$$u(x,t) = u_1 \frac{\partial}{\partial t} t - \frac{x \ddot{u}}{v \partial} + u_2 \frac{\partial}{\partial t} t + \frac{x \ddot{u}}{v \partial} \quad (4)$$

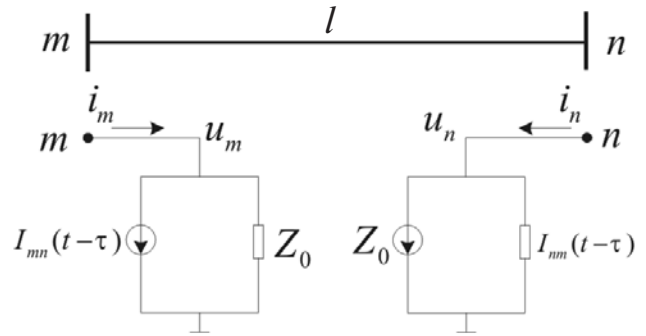


Рис. 2. Схема модели линии электропередачи «провод–земля» и одной фазы трехфазной линии

$$i(x,t) = i_1 \frac{\partial}{\partial t} t - \frac{x \ddot{i}}{v \partial} + i_2 \frac{\partial}{\partial t} t + \frac{x \ddot{i}}{v \partial} \quad (5)$$

где u_1 и i_1 – волны напряжения и тока, распространяющиеся от точки m до точки n со скоростью v ; u_2 и i_2 – волны напряжения и тока, распространяющиеся от точки n к m со скоростью v ; x – расстояние от точки m (перед i_2 стоит знак минус, поскольку i_2 и i_1 противоположны по фазе).

Формулы (4) и (5) называются волновыми уравнениями.

Отношение волны напряжения к соответствующей волне тока называется волновым сопротивлением Z_0 :

$$\begin{aligned} i_1(x,t) &= \frac{u_1(x,t)}{Z_0}; \\ i_2(x,t) &= \frac{u_2(x,t)}{Z_0}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $Z_0 = \sqrt{L_0 / C_0}$.

Умножив каждый член в (5) на Z_0 , с учетом (6) получим:

$$Z_0 i(x,t) = u_1 \frac{\partial}{\partial t} t - \frac{x \ddot{i}}{v \partial} + u_2 \frac{\partial}{\partial t} t + \frac{x \ddot{i}}{v \partial} \quad (7)$$

При сложении (4) и (7) получаем:

$$u(x,t) + Z_0 i(x,t) = 2u_1 \frac{\partial}{\partial t} t - \frac{x \ddot{u}}{v \partial} \quad (8)$$

при вычитании (7) из (4)

$$u(x,t) - Z_0 i(x,t) = 2u_2 \frac{\partial}{\partial t} t + \frac{x \ddot{u}}{v \partial} \quad (9)$$

Поскольку для точки m $x = 0$, то из (8) следует:

$$u_m(t) + Z_0 i_m(t) = 2u_1(t); \quad (10)$$

для точки n $x = l$, и из (8) следует:

$$u_n(t) - Z_0 i_n(t) = 2u_1 \frac{\partial}{\partial t} t - \frac{l \ddot{u}}{v \partial} = 2u_1(t - t), \quad (11)$$

где t – время пробега волны тока и напряжения вдоль всей линии от точки m до n (или от n до m). Так как формула (10) действительна для любого момента времени, можно заменить t в (10) на $(t - t)$:

$$u_m(t-t) + Z_0 i_m(t-t) = 2u_1(t-t). \quad (12)$$

Как видно, правые части (11) и (12) одинаковы, поэтому их левые части тоже должны быть равны:

$$u_m(t-t) + Z_0 i_m(t-t) = u_n(t) - Z_0 i_n(t). \quad (13)$$

Отсюда получаем формулу для определения $i_n(t)$ в любой момент времени t :

$$i_n(t) = \frac{u_n(t)}{Z_0} - \frac{u_m(t-t)}{Z_0} - i_m(t-t) = \frac{u_n(t)}{Z_0} + I_{nm}(t-t), \quad (14)$$

где $I_{nm}(t-t) = -\frac{u_m(t-t)}{Z_0} - i_m(t-t)$.

Член $\frac{u_n(t)}{Z_0}$ представляет волну тока от точки n к m , который определяется напряжением $u_n(t)$ в момент времени t .

Член $I_{nm}(t-t)$ представляет обратный ток, проходящий от точки m к n с момента времени $(t-t)$ до момента t . Таким образом на стороне n можем вычислить $i_n(t)$ для любого времени t .

Исходя из (9) можно получить формулу для вычисления тока $i_m(t)$ на стороне m , проходящего от точки m к точке n в любой момент времени t :

$$i_m(t) = \frac{u_m(t)}{Z_0} - \frac{u_n(t-t)}{Z_0} - i_n(t-t) = \frac{u_m(t)}{Z_0} + I_{mn}(t-t), \quad (15)$$

где $I_{mn}(t-t) = -\frac{u_n(t-t)}{Z_0} - i_n(t-t)$.

Формулы (14) и (15) называются парой формул Бержерона:

$$\begin{aligned} i_m(t) &= \frac{u_m(t)}{Z_0} + I_{mn}(t-t); \\ I_{mn}(t-t) &= -\frac{u_n(t-t)}{Z_0} - i_n(t-t); \\ i_n(t) &= \frac{u_n(t)}{Z_0} + I_{nm}(t-t); \\ I_{nm}(t-t) &= -\frac{u_m(t-t)}{Z_0} - i_m(t-t). \end{aligned} \quad (16)$$

Формула (16) графически проставлена на рис. 2, которая называется Бержерон модель линий электропередачи «провод–земля».

Формулу (16) можно использовать лишь для линий с равномерными параметрами без повреждения на линии и в симметричных режимах.

Для трехфазных линий в несимметричных режимах необходимо преобразовать все фазные величины в симметричные составляющие. Затем вычислить каждую составляющую и потом комбинировать их и трансформировать обратно в фазные величины. Обычно используют «Карапбуогер-составляющие», так как в этом случае матрица трансформации состоит только из вещественных чисел, что упрощает вычисление. Матрица имеет вид:

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & 1 & 1 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & 1 - 2j & 1 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & 1 & -2j \end{bmatrix} \begin{matrix} \dot{U} \\ \dot{U} \\ \dot{U} \end{matrix} \quad (17)$$

$$[S]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & 1 & 1 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & 1 - 1 & 1 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{matrix} \dot{U} \\ \dot{U} \\ \dot{U} \end{matrix} \quad (18)$$

где $[S]$ – матрица прямой трансформации, фазных величин на «Карапбуогер-составляющие»; $[S]^{-1}$ – матрица обратной трансформации.

В модели Бержерона, показанной на рис. 2, не учитываются R_0 и G_0 линии. Результаты вычисления по этой модели имеют достаточную точность для практики. Для получения более точных результатов нужно учитывать активное сопротивление линии. При этом расчетная схема линии принимается в виде, показанном на рис. 3.

В этом случае формулы модели Бержерона будут:

$$\begin{aligned} i_m(t) &= \frac{u_m(t)}{Z} + I_{nm}(t-t); \\ I_{mn}(t-t) &= \frac{1-h}{2} \frac{u_m(t-t)}{Z} + h i_m(t-t) \dot{U}; \\ I_{mn}(t-t) &= \frac{1+h}{2} \frac{u_n(t-t)}{Z} + h i_n(t-t) \dot{U}; \\ i_n(t) &= \frac{u_n(t)}{Z} + I_{nm}(t-t); \\ I_{nm}(t-t) &= \frac{1-h}{2} \frac{u_n(t-t)}{Z} + h i_n(t-t) \dot{U}; \\ I_{nm}(t-t) &= \frac{1+h}{2} \frac{u_m(t-t)}{Z} + h i_m(t-t) \dot{U} \end{aligned} \quad (19)$$

где $Z = Z_0 + R/4$; $h = \frac{R}{\omega Z_0} - \frac{R}{4\omega Z_0} + \frac{R}{4\omega Z_0}$
 $t = l/v = l\sqrt{L_0 C_0}$.

Если $R=0$, то уравнения (19) превращаются в (16).

Этап осуществления защиты. 1. Выбрать значения токов и напряжений на двух сторонах линий непрерывно всё время, получаем:

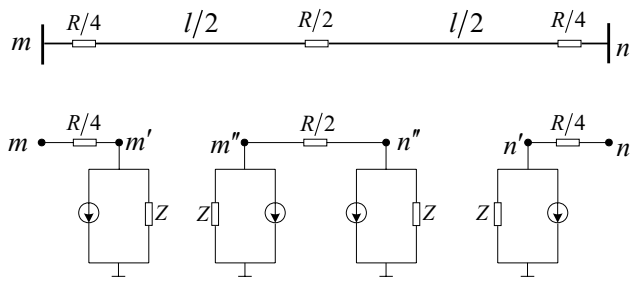


Рис. 3. Модель Бержерона с учетом сопротивления R

$u_m(t-t); u_m(t); i_m(t-t); i_m(t); u_n(t-t); u_n(t); i_n(t-t); i_n(t)$.

2. Передать все сэмплированные значения токов и напряжений на противоположную сторону с помощью канала связи.

3. Зная $u_m(t-t); u_m(t); i_m(t-t); i_m(t)$ и $u_n(t-t); u_n(t); i_n(t-t); i_n(t)$, можно по (16) вычислить $I_{nm}(t-t)$ и $I_{mn}(t-t)$.

4. Определить по (16):

$$\begin{cases} \dot{i}_{mрас}(t) = \frac{u_m(t)}{Z_0} + I_{mn}(t-t); \\ \dot{i}_{nрас}(t) = \frac{u_n(t-t)}{Z_0} + I_{nm}(t-t). \end{cases}$$

5. Если на линии нет никакого повреждения, то модель Бержерона действительна: вычисленный ток должен быть равен замеренному значению тока в данный момент времени:

$$i_{mрас}(t) = i_m(t); i_{nрас}(t) = i_n(t).$$

6. Если на линии есть повреждение, то модель Бержерона нарушается: вычисленный ток не будет равен замеренному значению тока.

Пусть

$$Di_m(t) = |i_m(t) - i_{mрас}(t)|; Di_n(t) = |i_n(t) - i_{nрас}(t)|.$$

Защита должна работать при $Di_m(t) \geq Di_{уст}$ или $Di_n(t) \geq Di_{уст}$, где $Di_{уст}$ – уставка защиты, которая учитывает возможное ошибочное значение $Di_m(t)$ или $Di_n(t)$, вызванное любой несимметрией параметров линии и погрешностью расчета.

Перечисленные этапы являются первым вариантом выполнения защиты. Защиту можно выполнить по второму варианту.

Второй вариант выполнения защиты. Как известно, для равномерной линии, зная напряжение и ток на одной стороне линии электропередачи, можно вычислить напряжение и ток в любой точке на линии, если на линии нет никакого повреждения. Поэтому, используя напряжение $u_m(t)$ и рас-

считанный ток $i_m(t)$, можно рассчитать ток от точки m к точке P $i_{mP}(t)$ (см. рис. 1). Таким же образом можно рассчитать ток от точки n к точке P $i_{nP}(t)$. Сумма токов $i_{mP}(t)$ и $i_{nP}(t)$ может быть определена на обеих сторонах, и защита должна сработать, если

$$Di = |i_{mP}(t) - i_{nP}(t)| \geq Di_{уст},$$

где $Di_{уст}$ – уставка защиты.

Этот вариант выполнения превращает всю линию электропередачи в одну точку, при этом абсолютно удовлетворяется закон Кирхгофа.

Второй вариант особенно подходит случаю существования на линии продольной емкостной или поперечной индуктивной компенсации. Тогда в качестве точки рассмотрения (P) выбирается точка присоединения компенсирующих устройств к линии [4].

Описанное устройство защиты, изготовленное фирмой Си-Фоан, уже успешно работает на первой линии электропередачи напряжением 1000 кВ Китая с 2009 г. На рис. 4 показан результат цифрового моделирования. При сравнении тока по рис. 4, в с кривой рис. 4, а видно, что погрешность меньше 1% кГц. Это моделирование сделано на частоте выборки; в реальном устройстве частота 2,4 кГц; точность ещё выше.

Предлагаемый расчет тока короткого замыкания с помощью модели Бержерона линии электропередачи и дает возможность исключить влияние ёмкостных токов на работу защиты. Цифровое моделирование работы измерительного органа защиты и опыт эксплуатации показали возможность и преимущества этого нового принципа.

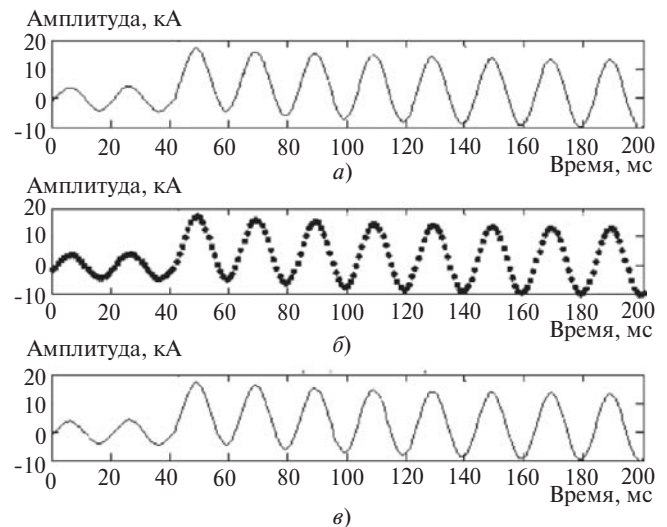


Рис. 4. Кривая реального тока повреждения (а); кривая тока по выборке (б); то же после интерполяции (расчет по модели Бержерона) (в)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEEE Std.C37.113-1999 Guide for Protective Relay.
2. Anderson P.M. Power system protection. – IEEE Press, New York: McGraw Hill, 1998.
3. Dommel H.W. Digital Computer Solution of Electro-Magnetic Transients in Single and Multiphase Networks. – IEEE PAS-88, 1969, April, 388.
4. HE Jiali, GUO Zheng. New principle of segregated phase current differential protection of long distance transmission line with series capacitive compensation (in Chinese). – RELAY, 2005, vol. 33, No. 1 (Jan.).

[24.09.14]

Авторы: Хо Дя-ли окончил Бин-Юан университет (Китай) в 1948 г. В 1961 г. окончил аспирантуру

Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 2, pp. 17–21.

Московского энергетического института и получил степень кандидата технических наук. Профессор Тяньцзиньского университета КНР.

Ли Юн-Ли окончила Тяньцзиньский университет в 1984 г. В 1993 г. получила степень доктора технических наук. Профессор Тяньцзиньского университета КНР.

Ли Бин окончил Тяньцзиньский университет в 1999 г. В 2005 г. получил степень доктора. Доцент Тяньцзиньского университета КНР.

Сюе Ши-Мин окончила Тяньцзиньский университет в 2002 г. В 2008 г. получила степень доктора. Доцент Тяньцзиньского университета КНР.

A New Principle for Implementing Differential Current Protection for Extra-High-Voltage Power Lines

HO DYA-LI, LI YUN-LI, LI-BIN and SYUE SHI-MIN

Shunt capacitive currents have a strong effect on the operation of differential current protection of extra-high-voltage power lines. A new principle is proposed for implementing the protection and determining the short-circuit fault current in using the Bergeron model of power lines, which automatically takes into account capacitive currents and eliminates their influence on the operation of protection. Formulas of the Bergeron model are presented, and digital simulation of the protection measuring element is carried out. The simulation results and operating experience demonstrate the feasibility and advantages of this principle. Differential current protections constructed based on this principle with the use of a fiber-optic channel have successfully been in operation for already 4 years in China's first 1000 kV power line.

Key words: power lines, relay protection, Bergeron model

REFERENCES

1. IEEE Std.C37.113-1999 Guide for Protective Relay.
2. Anderson P.M. Power system protection. – New York: McGraw Hill, IEEE Press, 1998.
3. Dommel H.W. Digital Computer Solution of Electro-Magnetic Transients in Single and Multiphase Networks. – IEEE PAS-88, 1969, April, 388.
4. HE Jiali, GUO Zheng. New principle of segregated phase current differential protection of long distance transmission line with series capacitive compensation (in Chinese). – RELAY, 2005, vol. 33, No. 1 (Jan.).

Authors: He Jiali (Tianjin, China) – Cand. Techn. Sci., Professor of the Tianjin University (China).

Li Yongli (Tianjin, China) – Doct. Techn. Sci., Professor at Tianjin University (China).

Li Bin (Tianjin, China) – Doctor Techn. Sci., Associate Professor at Tianjin University (China).

Xue Shimin (Tianjin, China) – Doctor Techn. Sci., Associate Professor at the Tianjin University (China).

