

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ НЕПОЛНОФАЗНЫХ ВКЛЮЧЕНИЯХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

И.Р. Пивчик

Рассмотрены особенности протекания электромагнитных переходных процессов при неполнофазных включениях линий электропередачи с трансформаторами. Предложен алгоритм расчета и разработано устройство для предотвращения явления феррорезонанса в этих режимах.

Феррорезонансные перенапряжения при неполнофазном включении линии электропередачи с трансформаторами (Тр) на отпайках, нейтраль которых изолирована, хорошо изучены [1]. Однако мероприятий по предотвращению феррорезонанса недостаточно. Глухое заземление нейтрали одного из Тр на линии приводит к заглублению релейных защит по токам нулевой последовательности до нечувствительности к КЗ с обрывом провода. В неполнофазном режиме Тр с заземленной наглухо нейтралью могут перегружаться с отключением релейной защитой. Избежать холостых режимов невозможно, поскольку в случае обрыва провода под нагрузкой в связи с появлением в этом режиме обратной последовательности происходит отключение двигателей.

Расчет феррорезонанса выполнен для того, чтобы показать принципиальную невозможность его подавления с помощью вентильных разрядников и для оценки условий работы резисторов в нейтрали при разработке автоматической системы отключения неполнофазно включенной линии. Исследуемая схема неполнофазно включенной линии электропередачи с трансформатором представлена на рисунке 1. Включена одна фаза линии электропередачи. В конце линии подключен Тр. Нейтраль линии принималась заземленной через резистор или вентильный разрядник.

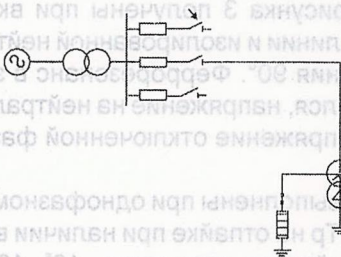


Рис. 1

Начало линии описывалось следующими выражениями

$$U_{d1} = U_m \sin(\omega t + \varphi),$$

$$i_{d1} = Z_{11}^{-1}(U_{d1} + U_q),$$

$$U_{d2} = U_{d3} = Z_{12}i_{d1} - U_{q2}.$$

Для конца линии расчетные формулы в зависимости от наличия сопротивления в нейтрали различны.

Поскольку индуктивность рассеяния Тр оказывает на исследуемые явления ничтожно малое влияние, то в дальнейшем ею можно пренебречь.

Если нейтраль Тр изолирована, то поток Ψ_1 и намагничивающий ток i_μ включаемой под напряжение фазы Тр равны соответственно сумме потоков и токов в двух других фазах:

$$Y_1 = Y_2 + Y_3, \quad i_{\mu 1} = i_{\mu 2} + i_{\mu 3},$$

$$-\frac{d\Psi_1}{dt} = U_{12} - U_{23},$$

$$-\frac{d\Psi_2}{dt} = U_{23} - U_{31},$$

$$-\frac{d\Psi_3}{dt} = U_{31} - U_{12},$$

тогда $\Psi_1' + \Psi_2' + \Psi_3' = 0$.

Для обмотки, соединенной в звезду:

$$U_1 - U_H = \Psi_1', \quad i_1 = i_{\mu 1} + i_0,$$

$$U_2 - U_H = \Psi_2', \quad i_2 = i_{\mu 2} + i_0,$$

$$U_3 - U_H = \Psi_3', \quad i_3 = i_{\mu 3} + i_0,$$

где i_0 – ток в фазах обмотки, соединенной в треугольник,

$$U_H = \frac{1}{3}(U_1' + U_2' + U_3').$$

Используя уравнение линии электропередач

$$U_d + (Z + Z_s) \cdot i_d = U_p,$$

найдем

$$U_d = U_p - (Z + Z_s) \cdot i_\mu - (Z + Z_s) \cdot i_0,$$

$$i_0 = \frac{1}{3}(g_H U_H - i_{\mu 1} - i_{\mu 2} - i_{\mu 3}),$$

так как

$$i_H = g_H U_H, \quad 3i_H = 3i_0 + i_{\mu 1} + i_{\mu 2} + i_{\mu 3},$$

то

$$\frac{d\Psi_1}{dt} = U_1 - U_0,$$

где U_1 – напряжение на вводе трансформатора, U_0 – напряжение на нейтрали.

Это выражение дополняется расчетной формулой линии электропередачи

$$U_d + (Z + Z_s) \cdot i_d = U_p,$$

здесь U_d, i_d – матрицы напряжений и токов Тр,

$$U_{d1} = U_{p1} - (Z_{11} - Z_{12})i_{d1},$$

$$U_{d2} = U_{d3} = U_{p2} + 0,5(Z_{11} - Z_{12})i_{d1},$$

$$U_0 = \frac{1}{3}(U_1 + U_2 + U_3) = \frac{1}{3}(U_{p1} + U_{p2} + U_{p3}).$$

При этом

$$\frac{d\Psi_1}{dt} = \frac{2}{3}U_{p1} - \frac{1}{3}U_{p2} - \frac{1}{3}U_{p3} - (Z_{11} - Z_{12}) \cdot i_{d1},$$

где

$$i_{d1} = a\Psi_1 + b\Psi_1^n + c\Psi_1^m.$$

Вычисление Ψ_1 позволяет определить i_{d1} и затем $i_{d2} = i_{d3} = -0,5i_{d1}$, после чего вычисляются напряжения U_d :

$$U_d = U_p - (Z + Z_s) \cdot i_d.$$

При заземлении нейтрали через сопротивление, и пренебрежении индуктивностью рассеяния Тр для обмотки, соединенной в треугольник, обозначив

$$(Z + Z_s) \cdot i_0 = \begin{vmatrix} Z_0 & i_0 \\ Z_0 & i_0 \\ Z_0 & i_0 \end{vmatrix},$$

где $Z_0 = Z_{11} + Z_{12} + Z_{13}$, получим

$$Z_0 i_0 = \frac{1}{3}Z_0 \cdot [g_n(U_1 + U_2 + U_3) + i_{\mu 1} + i_{\mu 2} + i_{\mu 3}].$$

После этого

$$\frac{d\Psi}{dt} = K \cdot \left\{ K_g^{-1} \cdot [U_p + (Z + Z_s - Z_0^{-1}) \cdot i_{\mu}] \right\},$$

где

$$K = \begin{vmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{vmatrix}, \quad Z_0 = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} Z_0 & Z_0 & Z_0 \\ Z_0 & Z_0 & Z_0 \\ Z_0 & Z_0 & Z_0 \end{vmatrix},$$

$$K_g = \begin{vmatrix} 1 + 9^{-1}Z_0g_n & 9^{-1}Z_0g_n & 9^{-1}Z_0g_n \\ 9^{-1}Z_0g_n & 1 + 9^{-1}Z_0g_n & 9^{-1}Z_0g_n \\ 9^{-1}Z_0g_n & 9^{-1}Z_0g_n & 1 + 9^{-1}Z_0g_n \end{vmatrix}.$$

Расчеты выполнялись при неполнофазном включении линий разной длины с Тр различной мощности. Типичные результаты расчета, выполненного при однофазном включении линий длиной 18 км с Тр 10 МВА, 110 кВ на ее конце, представлены на рисунках 2–5.

На рисунке 2 приведены осциллограммы феррорезонанса переходного и устанавливающегося процессов при включении одной фазы в момент

прохождения напряжения на этой фазе через нуль при неполнофазном включении линии электропередачи с ненагруженным трансформатором и незаземленной нейтралью (а – начало процесса, б – его продолжение). Кривая 1 представляет изменение напряжения на вводе Тр отключенной фазы, 2 – напряжение на нейтрали, 3 – ток намагничивания включенной фазы, 4 – магнитный поток включенной фазы, 5 – напряжение на вводе включенной фазы. Напряжения даны в одном масштабе, амплитуда кривой 5 равна 100 кВ.

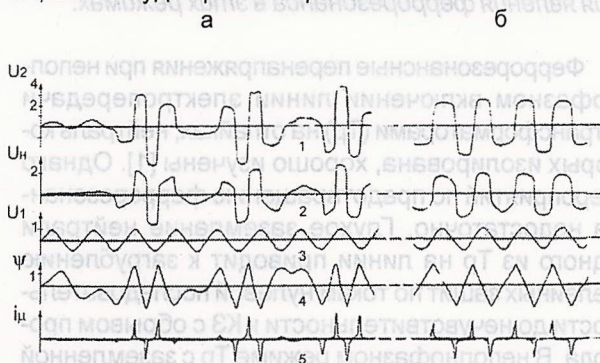


Рис. 2

Амплитуда первого максимума потока в относительных единицах составляет 1,2. Напряжение на включенной фазе синусоидальное. На нейтрали и отключенных фазах напряжение имеет сложную форму, которая со временем принимает вид прямоугольных импульсов. Максимальное напряжение на вводе отключенной фазы 400 кВ, т.е. близко к четырехкратному, а на нейтрали – около 300 кВ. В установившемся режиме напряжение на отключенной фазе близко к двукратному, а на нейтрали – к 1,7–1,8 U_{ϕ} . В процессе изменения поток принимает треугольную форму. При других углах включения, близких к 90°, феррорезонанс может не возникнуть. При угле включения 45° феррорезонанс возникает, но процесс его установления длится очень долго.

Кривые рисунка 3 получены при включении одной фазы линии и изолированной нейтрали при угле включения 90°. Феррорезонанс в этом случае не развился, напряжение на нейтрали близко к 0,45 U_{ϕ} . Напряжение отключенной фазы равно 0,25 U_{ϕ} .

Расчеты выполнены при однофазном включении линии с Тр на отпайке при наличии в цепи заземления нейтрали резистора 10⁵, 10⁴, 10³ Ом и угле включения 0°. Резистор 10 Ом не привел к исчезновению резонанса, а лишь изменил характер начала процесса.

При наличии в нейтрали резисторов 10⁴ и 10³ Ом феррорезонанс не возникал, а установившийся и переходный процессы в обоих случаях разные. При разземленной нейтрали установившееся

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ НЕПОЛНОФАЗНЫХ ВКЛЮЧЕНИЯХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

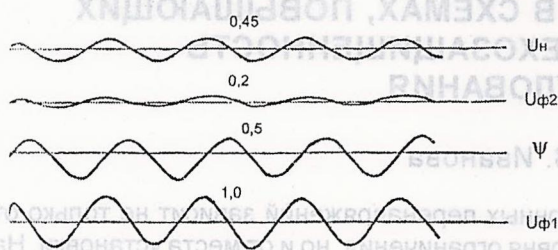


Рис. 3

ся значение магнитного потока включенной фазы в относительных единицах равно 0,5, а при заземленной наглухо нейтрали – 1. Поэтому при заземлении нейтрали через резистор 10^4 Ом установившийся поток меньше, чем при заземлении через резистор 10^3 Ом. На рисунке 4 представлены осциллограммы при наличии в нейтрали резистора 10^3 Ом и при угле включения 0° .

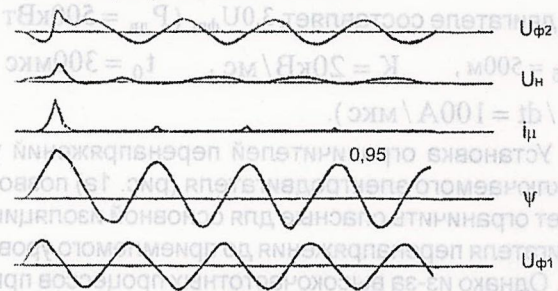


Рис. 4

В отсутствие феррорезонанса напряжение на отключенной фазе тем больше, чем меньше сопротивление нейтрали, и равно $0,5U_{\phi}$. При глухом заземлении это напряжение находится в противофазе с напряжением включенной фазы в случае глухого заземления нейтрали и в одной фазе в случае изолированной нейтрали. При заземлении нейтрали через резисторы с различными значениями сопротивления углы между напряжениями на отключенной и включенной фазах будут находиться в промежутке между 0 и 180° . При заземлении нейтрали через резистор 10^3 Ом сдвиг напряжений составил 30° , а при заземлении через резистор 10^4 Ом – 90° .

На рисунке 5 представлены осциллограммы работы вентильного разрядника в нейтрали трансформатора. Разрядник состоит из двух последовательно соединенных РВС-35 и РВС-15, со стандартным начальным сопротивлением и коэффициентом нелинейности, принятым в расчете 0,4. У указанных разрядников коэффициент нелинейности зависит от тока и меняется в пределах 0,45–0,3 (0,45 при малых, а 0,3 – при больших токах). В рассматриваемом нами случае в нейтрали возможны токи 200–400 А, которые можно считать малыми.

По достижении напряжением на нейтрали величины, достаточной для срабатывания разрядника (кривая 2), искровые промежутки пробиваются, появляется импульс тока, который быстро уменьшается

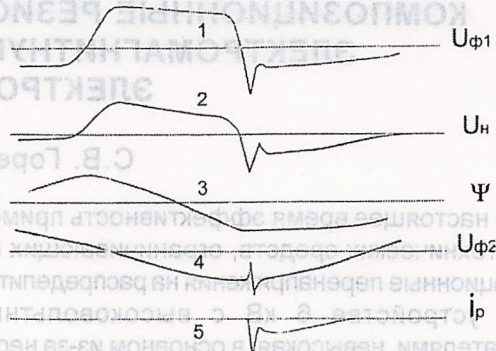


Рис. 5

до минимального значения, далее увеличивается и затем относительно медленно уменьшается. Напряжение срабатывания разрядника при втором и третьем срабатывании меньше, чем при первом. Поэтому при последующих срабатываниях разрядника увеличивается амплитуда высокочастотной составляющей тока в разряднике и возникают условия для быстрого обрыва тока в разряднике, что в свою очередь ускоряет повторное возникновение феррорезонансных перенапряжений.

Расчетами показано, что после срабатывания разрядника и угасания дуги сопровождающего тока, перенапряжения восстанавливаются, а это приводит к новому срабатыванию с последующим угасанием дуги и т.д. до разрушения разрядника. Из результатов расчета следует, что при неполнофазной работе линии электропередачи с Тр феррорезонанс может быть предотвращен заземлением нейтрали Тр через резистор. При этом сопротивление резистора в нейтрали должно отвечать ряду условий:

- обеспечивать предотвращение феррорезонанса;
- влиять на условия работы релейных защит;
- обеспечивать грозозащиту нейтрали;
- соответствовать производству.

Указанным условиям отвечает резистор сопротивлением 1000–2000 Ом. Такой резистор может быть только бетэловым.

Для исключения длительной работы неполнофазно включенной линии, опасной для потребителя и бетэловых резисторов в нейтрали, разработано устройство для отключения такой линии. Устройство включено в фильтр тока 0-последовательности и работало от гармоник токов намагничивания.

Задержка отключения на 10–20 с позволяет исключить его срабатывание при несимметриях, вызванных КЗ (за указанное время КЗ в электрической сети ликвидируются).

С учетом природно-климатических условий устройство заземления может быть упрощено.

Литература

Гашимов А.М. Численный анализ волновых процессов в электрических сетях / А.М. Гашимов, Е.В. Дмитриев, И.Р. Пивчик. Новосибирск: Наука, 2003. 147 с.