

УДК 621.316

Е.В. Иванова, доктор технических наук**Ш.А. Рақымжан**,**Д.М. Иванов**

Инновационный Евразийский университет (г. Павлодар),

E-mail: rakhimzhanov2016@list.ru

Влияние кондуктивной электромагнитной помехи на ток замыкания фазы на землю в сетях 6 – 35 кВ

Аннотация. В статье представлена исследование влияния резистора в нейтрали сети от 6 до 35 кВ на кондуктивную электромагнитную помеху по току замыкания на землю. Предложена математическая модель.

Ключевые слова: ток замыкания на землю, резистор в нейтрали сети, кондуктивная электромагнитная помеха

Нелинейная нагрузка в сети 6-35 кВ оказывает существенное воздействие на ток замыкания фазы на землю. Для прогнозирования этого тока при металлическом замыкании, когда активное сопротивление R_3 в месте замыкания на землю не учитывается ($R_3 = 0$), используется математическая модель [1, 3]

$$I_3 = I_C + kI_C M[K_U], \quad (1)$$

где I_C – ёмкостной ток замыкания на землю при синусоидальном и симметричном напряжении в сети, А;

k – коэффициент, учитывающий нелинейную зависимость тока I_3 от гармонического воздействия при несимметрии напряжений по обратной последовательности, $k = 0,05-0,10$;

$M[K_U]$ – математическое ожидание коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, %.

Относительная ошибка расчётов по этой формуле с вероятностью 0,95 находится в пределах $\pm 10\%$ при $0 < K_{2u} < 4\%$, где K_{2u} – коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности.

При превышении I_3 допустимого значения $I_{сд}$ сверх установленного времени, в сети появляется кондуктивная электромагнитная помеха (ЭМП) по току замыкания на землю. В этом случае эта помеха представляется выражением [3]:

$$\delta I_3 = \frac{I_3}{I_{сд}}. \quad (2)$$

Одним из эффективных способов подавления δI_3 является заземление нейтрали сети через резистор. В этой статье предлагается оценка влияния сопротивления резистора в нейтрали сети от 6 до 35 кВ на кондуктивную ЭМП δI_3 .

Первоначально исследуем зависимость тока I_3 от величины сопротивления резистора R_N в нейтрали сети с учётом сопротивления R_3 . На рисунке 1 представлена схема замещения сети напряжением 35 кВ с резистором R_N в её нейтрали, где r_A, r_B, r_C – соответственно активное сопротивление пути утечки тока через изоляцию фаз А, В, С; C_A, C_B, C_C – ёмкость фаз линии относительно земли; R_3 – активное сопротивление в месте замыкания фазы А на землю.

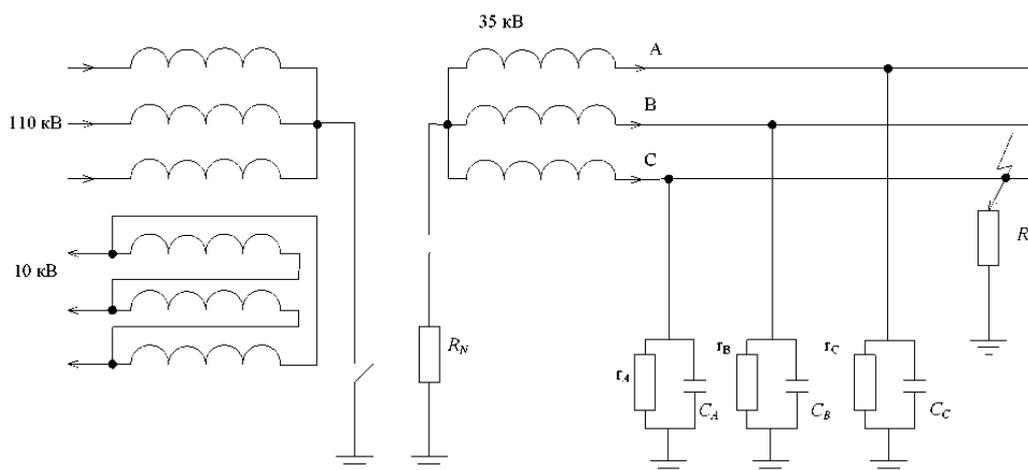


Рисунок 1 – Схема замещения сети напряжением 35 кВ с резистором R_N в её нейтрали

Проводимость Y_{A3} замкнувшейся на землю фазы А составляет

$$Y_{A3} = \frac{1}{R_3} + j\epsilon_A, \tag{3}$$

где ϵ_A – ёмкостная проводимость фазы А.
Напряжение фазы А при замыкании

$$\dot{U}_{A3} = \dot{U}_A - \dot{U}_N, \tag{4}$$

где \dot{U}_A – напряжение фазы А до её замыкания на землю; \dot{U}_N – напряжение смещения нейтрали.

Напряжение смещения нейтрали определяется по формуле [2]

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_A Y_{A3} + \dot{U}_B Y_B + \dot{U}_C Y_C}{Y_{A3} + Y_B + Y_C + Y_N}, \tag{5}$$

Пусть фазные напряжения источника симметричны и напряжение фазы А направлено по действительной оси. Тогда

$$\dot{U}_A = U; \dot{U}_B = a^2 U; \dot{U}_C = aU,$$

где a – фазный множитель

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}; a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

С учётом указанных фазных напряжений выражение (5) примет вид

$$\dot{U}_N = U \frac{Y_{A3} + a^2 Y_B + a Y_C}{Y_{A3} + Y_B + Y_C + Y_N}. \tag{6}$$

Тогда ток замыкания на землю I_3 будет равен

$$\dot{I}_3 = \dot{U}_{A3} \dot{Y}_3 = Y_3 (\dot{U}_A - \dot{U}_N) = U Y_3 \frac{Y_B (1-a^2) + Y_C (1-a) + Y_N}{Y_{A3} + Y_B + Y_C + Y_N} \tag{7}$$

Если положить одинаковыми проводимости всех фаз относительно земли, то есть $Y_A = Y_B = Y_C = Y$, то с учётом значения фазного множителя a , выражение (7) преобразуется к виду

$$\dot{I}_3 = U \dot{Y}_3 \frac{3\dot{Y} + \dot{Y}_N}{3\dot{Y} + \dot{Y}_3 + \dot{Y}_N}. \quad (8)$$

Активные проводимости фаз значительно меньше ёмкостных проводимостей. Если ими пренебречь, то выражение (8) можно преобразовать к виду

$$I_3 = U \left[\frac{(R_N + R_3) + (3\epsilon)^2 R_N^2 R_3^2}{(R_N + R_3)^2 + (3\epsilon)^2 R_N^2 R_3^2} + j \frac{3\epsilon R_N (R_N + R_3 - R_N R_3)}{(R_N + R_3)^2 + (3\epsilon)^2 R_N^2 R_3^2} \right] = I_{a,3} + jI_{p,3}, \quad (9)$$

где $I_{a,3}$, $jI_{p,3}$ – активная и реактивная составляющие тока замыкания на землю. Модуль тока замыкания на землю составляет

$$|I_3| = \sqrt{I_{a,3}^2 + I_{p,3}^2}. \quad (10)$$

При металлическом замыкании фазы на землю, то есть когда $R = 0$, можно записать

$$|I_3| = U \sqrt{(1/R_N)^2 + (3\epsilon)^2}. \quad (11)$$

Включение резистора проводимостью

$$(R_N)^{-1} = 3\epsilon m, \quad (12)$$

в нейтраль сети приводит к увеличению тока замыкания на землю ($m = 1, 2, 3, \dots$). В этом случае можно записать

$$|I_3| = 3U\epsilon\sqrt{1 + m^2} \quad (13)$$

Таким образом, если $m = 1,0$, то есть $(1/R_N) = 3\epsilon$, то ток замыкания возрастёт в $\sqrt{2}$. Дальнейшее увеличение коэффициента m , то есть дальнейшее снижение сопротивления резистора R_N , приведёт к увеличению тока замыкания на землю.

Теперь, выражая I_3 через кондуктивную ЭМП δI_3 в соответствии с формулой (2), можем, на основании математической модели (9), записать

$$\delta I_3 = \frac{U}{I_C} \left[\frac{(R_N + R_3) + (3\epsilon)^2 R_N^2 R_3^2}{(R_N + R_3)^2 + (3\epsilon)^2 R_N^2 R_3^2} + j \frac{3\epsilon R_N (R_N + R_3 - R_N R_3)}{(R_N + R_3)^2 + (3\epsilon)^2 R_N^2 R_3^2} \right]. \quad (14)$$

Видно, что δI_3 в значительной степени определяется сопротивлениями R_N и R_3 , которые неизвестны. Сопротивление R_N обуславливает горение дуги в месте пробоя, изоляции, поэтому будет рассмотрено отдельно, а сопротивление R_3 определяется классом напряжения сети. Так, для сети 35 кВ при пробое гирлянды изоляторов на железобетонной или металлической опоре можно принять $R_3 = (10-30)$ Ом, то есть это сопротивление равно сопротивлению растекания тока заземлителя опоры. Однако учёт сопротивления в месте замыкания до 30 Ом даёт небольшое снижение тока замыкания на землю.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Иванова, Е.В. Кондуктивные электромагнитные помехи в электроэнергетических системах / Е.В. Иванова, под. ред. В.П. Горелова, Н.Н. Лизалека – Новосибирск: Новосиб. гос. акад. вод. тран., 2006. – 432 с.
- 2 Обеспечение электромагнитной совместимости в системах электроснабжения общего назначения мощных электротермических нагрузок / Е.В. Иванова // Пром. энергетика. – М., 2004. – № 11. – С. 50-54.
- 3 Короткевич, М.А. Основные направления совершенствования эксплуатации электрических сетей / М.А. Короткевич. – Минск: Техноперспектива, 2003. – 373 с.
- 4 Электромагнитная обстановка в сети 10 кВ с изолированной нейтралью как рецептора / В.Г. Сальников [и др.] // Науч. пробл. трансп. Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – №1. – С. 219–223.

REFERENCES

- 1 Ivanov E.B. Conductus EMIS are in the electroenergy systems /of E.B.Ivanov, under. Ed. V.P. Gorelova, N.N. Lizaleka p Novosibirsk Novosib.gos.akad.vod.tran, 2006. – 432 p.
- 2 Providing of electromagnetic compatibility in the systems electro–supplies of the general setting of the powerful electrothermal loading / of E.B. Ivanov // of Prom. energy. – M, 2004. – № 11. – P. 50–54.
- 3 Karatkevich, M.A. Basic directions of perfection of exploitation of elektricheskikh networks / of M.A. 2003. p 373 p.
- 4 The Electromagnetic situation in a network 10 кВ with the insulated neutral as a receptor / of В.Г. Stuffing-boxes [and other] // Науч. пробл. трансп. Siberia and Far East. – 2009. – № 1. – P. 219–223.

ТҮЙІН

Е.В. Иванова, техникалық ғылымдарының докторы,

Ш.А. Рақымжан, Д.М. Иванов

Инновациялық Еуразия университеті (Павлодар қ.)

6–35 кВ желілердегі кондуктивті электромагниттік бөгеуілдердің ток тұйықталу фазасының жерге әсері

Мақалада әсерін зерттеу резистордың бейтарапты жерге тұйықтау желісінде 6-дан 35 кВ кондуктивті электромагниттік кедергі тогы бойынша жерге математикалық моделі тұйықталуы ұсынылған.

Түйін сөздер: ток жерге тұйықталу, резистор бейтарап желі, кондуктивті электромагниттік кедергі.

RESUME

Ye.V. Ivanova, doctor of technical sciences

Sh.A. Rakymzhan, D.M. Ivanov

Innovative University of Eurasia (Pavlodar)

The effect of conductive electromagnetic interference on the phase-to-ground fault current in 6-35 kV networks

The article presents a study of the effect of a resistor in a network neutral point from 6 to 35 kV on the conductive electromagnetic interference with the ground-fault current. A mathematical model is proposed.

Keywords: ground-fault current, resistor in the network neutral point, conductive electromagnetic interference.