

А.В. Солдатов, В.И. Антонов, В.А. Наумов,
Н.Г. Иванов, А.Ю. Сандомиров
(г. Чебоксары, Чувашский государственный университет,
г. Чебоксары, НПП «ЭКРА»)

ТОКИ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В ГЕНЕРАТОРНОЙ СЕТИ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ

В докладе рассматривается расчет токов гармоник в генераторной сети для целей релейной защиты генератора от замыканий на землю.

Расчет выполняется для токов со стороны линейных выводов генератора в двух схемах: нормальном режиме и режиме однофазного замыкания на землю (ОЗЗ). Во втором режиме рассматриваются ОЗЗ в обмотке статора генератора и в генераторной сети. Режим нейтрали электрической сети учтен заземлением через комплексное сопротивление \underline{Z}_N . Генератор учтен П-образной схемой замещения. Поперечные ветви генератора в схеме замещения представлены емкостями C_G . Примыкающая к генератору сеть эквивалентирована и представлена в виде Г-образной схемы замещения с комплексным сопротивлением \underline{Z}_L и емкостью относительно земли C_L . Как и в [1] полагаем, что система полностью симметрична, активные проводимости элементов сети относительно земли малы по сравнению с емкостными проводимостями, и не учитываются при расчете. Все элементы сети имеют линейные характеристики. Генератор является единственным источником в сети. ЭДС генератора представлена полигармоническим сигналом, содержащим кратные нечетные гармоники.

На рисунке 1 изображена эквивалентная схема рассматриваемого участка электрической сети в нормальном режиме и режимах внешнего (K1) и внутреннего (K2) ОЗЗ с учетом принятых допущений.

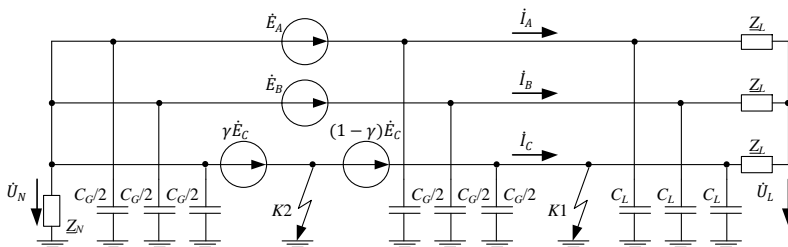


Рисунок 1 - Эквивалентная схема электрической сети

Расчет токов нормального режима. Токи высших гармоник в зависимости от частоты имеют разные пути протекания. Например, токи 3-й гармоники проявляют себя только в схемах нулевой последовательности, а токи 5-й гармоники – в схеме обратной последовательности [2].

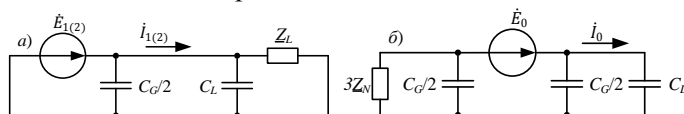


Рисунок 2 – Схема замещения электрической сети: а) - прямой (обратной) последовательности; б) - нулевой последовательности.

Определим токи гармоник, составляя для каждой из последовательностей тока свои электрические схемы (рис. 2). Ток прямой (обратной) последовательности со стороны фазных выводов генератора

$$I_{1(2)} = \left(\frac{1}{Z_L} + j\omega C_L \right) \dot{E}_{1(2)},$$

где $\dot{E}_{1(2)}$ – ЭДС генератора прямой (обратной) последовательности, ω – угловая частота.

Ток нулевой последовательности со стороны фазных выводов генератора

$$I_0 = \frac{j\omega C_L \left(\frac{1}{3Z_N} + j\omega \frac{C_G}{2} \right)}{j\omega C_G + j\omega C_L + \frac{1}{3Z_N}} \dot{E}_0,$$

где \dot{E}_0 – ЭДС генератора нулевой последовательности.

Расчет токов внешнего ОЗЗ. Токи со стороны фазных выводов генератора в режиме ОЗЗ в генераторной сети (рис. 1, режим К1)

$$\begin{aligned} i_{A(B)} &= (\dot{E}_{A(B)} - \dot{U}_0) \frac{1}{Z_L} + (\dot{E}_{A(B)} - \dot{E}_C) j\omega C_L, \\ i_C &= (\dot{E}_C - \dot{U}_0) \frac{1}{Z_L} + \dot{E}_C \left(\frac{3}{2} j\omega C_G + \frac{1}{Z_N} \right) \\ &\quad - (\dot{E}_A + \dot{E}_B - 2\dot{E}_C) \left(j\omega C_L + \frac{1}{2} j\omega C_G \right), \end{aligned}$$

где $\dot{U}_0 = \dot{U}_L - \dot{U}_N$ – разница потенциалов между нейтральными точками генератора и нагрузки, \dot{U}_L – напряжение между нейтральной точкой нагрузки и землей; \dot{U}_N – напряжение между нейтральной точкой генератора и землей.

Для гармоник ЭДС группы прямой последовательности (1, 7, 13... гармоник) выполняются следующие соотношения

$$\dot{E}_{A,1} = \dot{E}_1, \dot{E}_{B,1} = \underline{a}^2 \dot{E}_1, \dot{E}_{C,1} = \underline{a} \dot{E}_1, \dot{U}_{0,1} = 0, \quad (1)$$

где $\underline{a} = e^{j120^\circ}$. Тогда фазные токи

$$\begin{aligned} i_{A,1} &= \dot{E}_1 \left[\frac{1}{Z_L} + (1 - \underline{a}) j\omega C_L \right], \\ i_{B,1} &= \underline{a}^2 \dot{E}_1 \left[\frac{1}{Z_L} + (1 - \underline{a}^2) j\omega C_L \right], \\ i_{C,1} &= \underline{a} \dot{E}_1 \left(3j\omega C_G + 3j\omega C_L + \frac{1}{Z_L} + \frac{1}{Z_N} \right). \end{aligned}$$

Для гармоник ЭДС группы обратной последовательности (5, 11, 17... гармоник) выполняются соотношения

$$\dot{E}_{A,2} = \dot{E}_2, \dot{E}_{B,2} = \underline{a} \dot{E}_2, \dot{E}_{C,2} = \underline{a}^2 \dot{E}_2, \dot{U}_{0,2} = 0, \quad (2)$$

а фазные токи

$$\begin{aligned} i_{A,2} &= \dot{E}_2 \left[\frac{1}{Z_L} + (1 - \underline{a}^2) j\omega C_L \right], \\ i_{B,2} &= \underline{a} \dot{E}_2 \left[\frac{1}{Z_L} + (1 - \underline{a}) j\omega C_L \right], \\ i_{C,2} &= \underline{a}^2 \dot{E}_2 \left(3j\omega C_G + 3j\omega C_L + \frac{1}{Z_L} + \frac{1}{Z_N} \right). \end{aligned}$$

Для гармоник ЭДС группы нулевой последовательности (3, 9, 15... гармоник) выполняются соотношения

$$\dot{E}_{A,0} = \dot{E}_{B,0} = \dot{E}_{C,0} = \dot{U}_{0,0} = \dot{E}_0, \quad (3)$$

а фазные токи

$$\begin{aligned} i_{A,0} &= i_{B,0} = 0, \\ i_{C,0} &= \dot{E}_0 \left(\frac{3}{2} j\omega C_G + \frac{1}{Z_N} \right). \end{aligned}$$

Расчет токов ОЗЗ в обмотке статора генератора. Токи со стороны фазных выводов генератора в режиме ОЗЗ в генераторе (рис. 1, режим К2)

$$\begin{aligned} i_{A(B)} &= (\dot{E}_{A(B)} - \dot{U}_0) \frac{1}{Z_L} + (\dot{E}_{A(B)} - \gamma \dot{E}_C) j\omega C_L \\ i_C &= (\dot{E}_C - \dot{U}_0) \frac{1}{Z_L} + \dot{E}_C j\omega C_L (1 - \gamma). \end{aligned}$$

С учетом (1) фазные токи гармоник группы прямой последовательности

$$\begin{aligned} i_{A,1} &= \dot{E}_1 \left[\frac{1}{Z_L} + j\omega C_L (1 - \gamma \underline{a}) \right], \\ i_{B,1} &= \underline{a}^2 \dot{E}_1 \left[\frac{1}{Z_L} + j\omega C_L (1 - \gamma \underline{a}^2) \right], \\ i_{C,1} &= \underline{a} \dot{E}_1 \left[\frac{1}{Z_L} + j\omega C_L (1 - \gamma) \right]. \end{aligned}$$

С учетом (2) фазные токи гармоник группы обратной последовательности

$$\begin{aligned} i_{A,2} &= \dot{E}_2 \left[\frac{1}{Z_L} + j\omega C_L (1 - \gamma \underline{a}^2) \right], \\ i_{B,2} &= \underline{a} \dot{E}_2 \left[\frac{1}{Z_L} + j\omega C_L (1 - \gamma \underline{a}) \right], \\ i_{C,2} &= \underline{a}^2 \dot{E}_2 \left[\frac{1}{Z_L} + j\omega C_L (1 - \gamma) \right]. \end{aligned}$$

С учетом (3) фазные токи гармоник группы нулевой последовательности

$$i_{A,0} = i_{B,0} = i_{C,0} = \dot{E}_0 (1 - \gamma) j\omega C_L.$$

Выводы.

1. Схемы протекания токов высших гармоник в генераторной сети различны для отдельных групп последовательностей.

2. Фазные токи гармоник групп прямой и обратной последовательностей обусловлены, в основном, токами нагрузки, а фазные токи гармоник группы нулевой последовательности – емкостными токами.

Литература

1. *Кискачи В.М.* Расчет минимального уровня высших гармоник при однофазных замыканиях на землю в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью / Труды ВНИИЭ, 1966, Вып. 26. С. 89-105.

2. *Солдатов А.В., Антонов В.И., Наумов В.А., Иванов Н.Г.* Высшие гармоники тока синхронного генератора как информационные сигналы релейной защиты. / Тезисы этого сборника.