

Об одном аварийном случае в четырехпроводной трехфазной системе

В.И. Карлащук

Российский университет дружбы народов
wkarl@yandex.ru

1. Введение

Рассматриваемый случай наблюдался автором в январе 2012 года в корпусе №2 специализированного санатория в подмосковном поселке Кожино и в мае 2014 года в садовом обществе «Аэлита» (г. Обнинск Калужской обл.). Результатом аварии явился выборочный (в зависимости от подключенной фазы) выход из строя бытовых приборов, вызванный значительным повышением напряжения в коммунальной сети электроснабжения. Предварительный анализ показывает, что одной из причин аварии является существенная асимметрия коммунальной трехфазной сети, строящейся, как правило, по четырехпроводной схеме звезда-звезда [1], и изменение сопротивления в цепи нулевого провода (нейтрали).

2. Результаты расчётов и моделирования

Для исследования аварийного явления воспользуемся схемой модели, выполненной в среде программы Electronics Workbench [2] и представленной на рис. 1, где обозначено:

U_a, U_b, U_c — фазные напряжения;

I_a, I_b, I_c, I_o — линейные (фазные) токи и ток в нулевом проводе;

NC, NL — клеммы для подключения нулевых проводов источников и нагрузок;

$U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}, U_o$ — линейные и напряжение смещения нейтрали (для уменьшения влияния одноименных вольтметров на результаты моделирования их входные сопротивления увеличены до 100 Мом вместо 1 Мом по умолчанию);

R_a, R_b, R_c, R_o — сопротивления фазных нагрузок и нулевого провода (активный тип сопротивлений выбран для упрощения расчетов и в предположении, что такой выбор не оказывает существенного влияния на выявление сущности рассматриваемого явления);

U_{na}, U_{nb}, U_{nc} — напряжения на фазных нагрузках;

N — ключ для имитации обрыва нулевого провода (управляется клавишей N клавиатуры).

Поскольку в программе Electronics Workbench не допускается использование отрицательных фазных улов, то напряжения источников целесообразно представить в следующей комплексной форме:

$$\underline{U}_a = U_a; \underline{U}_b = U_b \cdot e^{j120^\circ}; \underline{U}_c = U_c \cdot e^{j240^\circ}.$$

В таком случае напряжения на фазных нагрузках, будут определяться формулами [1, 2]:

$$\underline{U}_{an} = \underline{U}_a + \underline{U}_o; \underline{U}_{bn} = \underline{U}_b + \underline{U}_o; \underline{U}_{cn} = \underline{U}_c + \underline{U}_o.$$

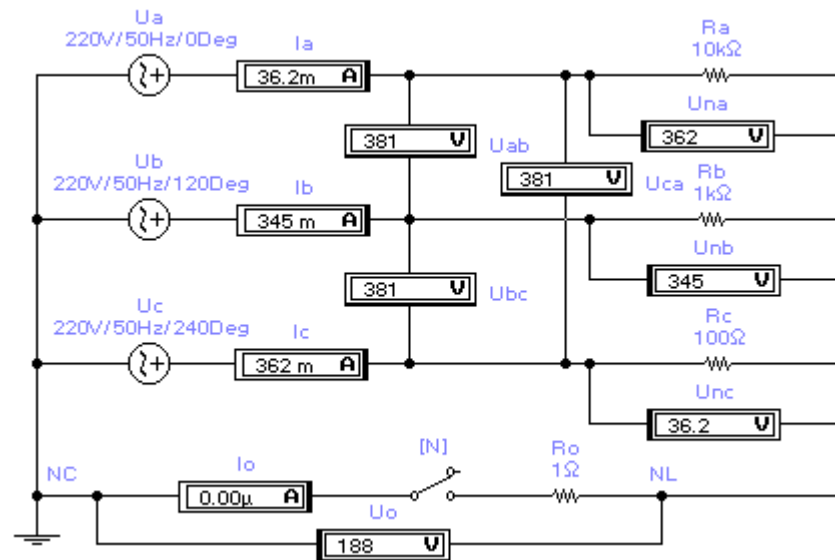


Рис. 1. Модель трехфазной системы звезда-звезда

Напряжение смещения нейтрали [1]:

$$\underline{U}_o = (Y_a \cdot \underline{U}_a + Y_b \cdot \underline{U}_b + Y_c \cdot \underline{U}_c) / (Y_a + Y_b + Y_c + Y_o),$$

где проводимости $Y_a = 1/R_a = 0,0001 \text{ См}$; $Y_b = 1/R_b = 0,001 \text{ См}$; $Y_c = 1/R_c = 0,01 \text{ См}$; $Y_o = 1/R_o = 0 \text{ См}$ (при разомкнутом ключе N).

Используя формулы представления комплексного числа в алгебраической, тригонометрической и показательной форме:

$$c = a + b \cdot j = d(\cos \varphi + j \cdot \sin \varphi) = d \cdot e^{j\varphi}; d = (a^2 + b^2)^{1/2}; \varphi = \arctg(b/a),$$

рассчитываем:

$$\begin{aligned} 1. \underline{U}_o &= (0,0001 \cdot 220 + 0,001 \cdot 220 e^{j120^\circ} + 0,01 \cdot 220 e^{j240^\circ}) / (0,0001 + 0,001 + 0,01 + 0) = 0,22[0,1 + (\cos 120^\circ + j \cdot \sin 120^\circ) + 10(\cos 240^\circ + j \cdot \sin 240^\circ)] / 0,0111 = \\ &= 19,82[0,1 + (-0,5 + j \cdot 0,866) + 10(-0,5 - j \cdot 0,866)] = 19,82[-5,4 - j \cdot 7,794] = \end{aligned}$$

$187,93e^{155,28^\circ}$ В, т. е. расчетное значение напряжения смещения нейтрали полностью совпадает с полученным при моделировании (см. показания трехразрядного вольтметра U_o на рис. 1).

$$2. \underline{U}_{an} = \underline{U}_a + \underline{U}_o = 220 + 187,93e^{155,28^\circ} = 220 + 187,93(\cos 55,28^\circ + j \sin 55,28^\circ) = 220 + 187,93(0,57 + 0,822j) = 327,12 + 154,48j = 361,76e^{j25,3^\circ} \text{ В}$$

$$3. \underline{U}_{bn} = \underline{U}_b + \underline{U}_o = 220e^{j120^\circ} + 187,93e^{155,28^\circ} = 220(\cos 120^\circ + j \sin 120^\circ) + 187,93(\cos 55,28^\circ + j \sin 55,28^\circ) = 220(-0,5 + j \cdot 0,866) + 187,93(0,57 + 0,822j) = 345,01e^{j89,52^\circ} \text{ В.}$$

$$4. \underline{U}_{cn} = \underline{U}_c + \underline{U}_o = 220e^{j240^\circ} + 187,93e^{155,28^\circ} = 220(\cos 240^\circ + j \sin 240^\circ) + 187,93(\cos 55,28^\circ + j \sin 55,28^\circ) = 220(-0,5 - j \cdot 0,866) + 187,93(0,57 + 0,822j) = 36,157e^{j85,43^\circ} \text{ В.}$$

Из приведенных в пп. 2, 3, 4 результатов расчета и показаний приборов на рис. 1 видно, что с учетом разрядности вольтметров они полностью совпадают с результатами моделирования. Учитывая это обстоятельство, при дальнейших исследованиях можно ограничиться только результатами моделирования. В частности, на рис. 2 представлены результаты моделирования при $R_o = 0,1$ Ом (практически полностью исправная система). Для других значений R_o результаты моделирования приведены в табл. 1.

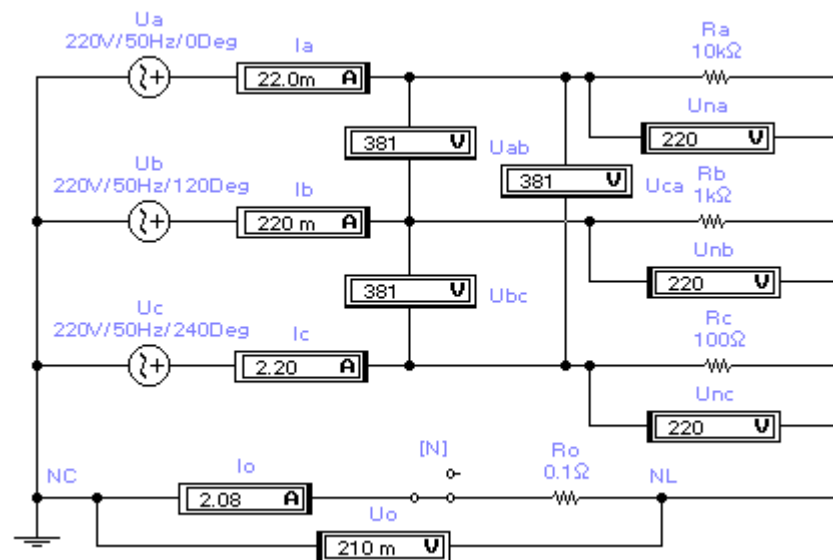


Рис.2. Модель «исправной» трехфазной системы звезда-звезда

Таблица 1. Зависимость напряжений на нагрузках и напряжения смещения нейтрали от сопротивления нулевого провода

Параметры при $R_o =$	1 Ом	10 Ом	100 Ом	1 кОм	10 кОм
U_o , В	2,06	18,8	98,9	172	186
U_{an} , В	221	231	288	348	360
U_{bn} , В	221	229	277	332	344
U_{cn} , В	218	201	122	50,2	37,6

В заключение приведем результаты моделирования при обрыве нулевого провода и активно-индуктивной нагрузке с соотношением сопротивлений 50:50 (рис. 3). Из сравнения данных на рис. 1 и 3 видно, что они отличаются только возросшими фазными (линейными) токами из-за уменьшения коэффициента мощности с $\cos \varphi = 1$ для рис. 1 до $\cos \varphi = \cos [\arctg(X/R)] = \cos 45^\circ = 0,707$ для рис. 3. Например, для схемы на рис. 1 ток $I_a = 51,2 \cdot \cos \varphi = 51,2 \cdot 0,707 = 36,2$ мА, т. е. в 1,414 раза меньше тока I_a на рис. 3.

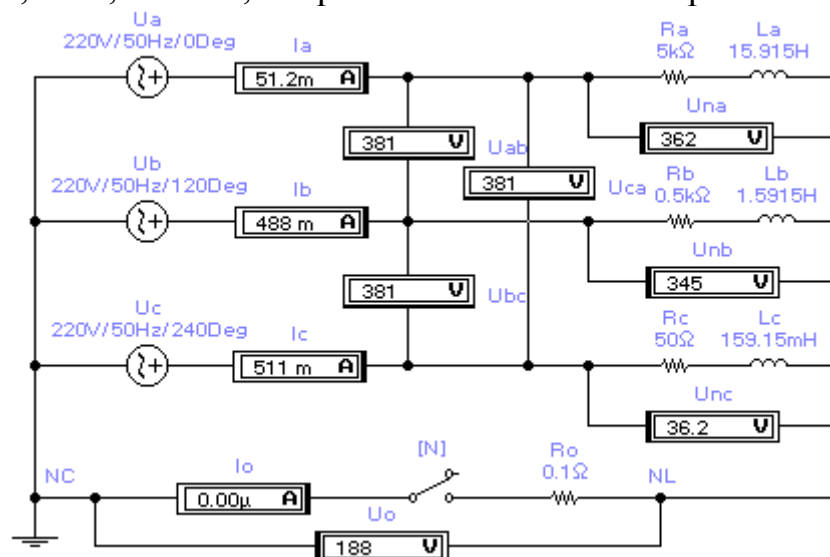


Рис. 3. Модель системы звезда-звезда при активно-индуктивной нагрузке

3. Заключение

В результате расчёта и моделирования несимметричной трехфазной системы звезда-звезда установлено, что

— основной причиной перенапряжений в четырехпроводной коммунальной сети электропитания и выходу из строя по этой причине бытовых приборов является повышение сопротивления нулевого провода или его обрыв (наихудший случай);

— наиболее опасной для потребителя является наименее нагруженная в момент аварии фаза и, наоборот, наименее опасна наиболее нагруженная фаза;

— в аварийном случае и при пренебрежимо малом сопротивлении обмоток генератора или трансформатора линейные напряжения системы остаются неизменными, что практически исключает влияние сопротивления нулевого провода на режим работы нагрузок, подключенных треугольником.

Список литературы

1. Атабеков Г.И. Основы теории цепей: учебник. Изд. 3-е, стер.— М.: СПб.: Лань, 2009, 432 с.
2. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC / Том 1. Моделирование элементов аналоговых систем на Electronics Workbench и MATLAB. Изд. 6-е пер. и доп. — М.: Солон-Пресс, 2006, 720 с.

Первая редакция — 08.09.2014