

УДК 622.862

СПОСОБ КОМПЕНСАЦИИ ЕМКОСТНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОКА УТЕЧКИ НА ЗЕМЛЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ЧАСТОТЫ

М.С. Дубинин, ассистент; К.Н. Маренич, Ph. D., к. т. н., доцент
(Донецкий Национальный технический университет, г. Донецк, Украина)

В соответствии с требованиями безопасности (ГОСТ22929-78), устройство компенсации емкостной составляющей тока утечки должно быть непрерывно действующим и ограничивать ток утечки, протекающий под действием рабочего напряжения и ЭДС вращающихся двигателей. Устройство компенсации в диапазоне изменения емкости сети 0.1 до 1 мкФ на фазу должно снижать кратковременный ток утечки до значения 0.1 А или ограничивать количество электричества до значения не более 50 мА*с.

В существующих устройствах защиты применяются статические компенсаторы на основе дросселя и автоматические, использующие дроссель с подмагничиванием для автоматической настройки в резонанс при изменении емкости сети относительно земли. Основным недостатком существующих дроссельных компенсаторов является фиксированная частота резонанса 50 Гц. При изменении частоты рабочего напряжения, например, в процессе выбега двигателя при его отключении от силового трансформатора, эффективность компенсации снижается. В электрических сетях с преобразователем частоты дроссельный компенсатор с фиксированной частотой резонанса неэффективен вследствие широкого изменения частоты рабочего напряжения. Известна разработка дроссельного компенсатора, в которой частота резонанса автоматически поддерживается равной частоте рабочего напряжения преобразователя [1]. Данное устройство обеспечивает настройку дросселя в резонанс с первой гармоникой рабочего напряжения и снижает емкостную составляющую тока утечки до допустимого значения (менее 100 мА) при емкости сети относительно земли менее 0,22 мФ на фазу. Однако, при емкостях сети более 0,2 мФ на фазу ток утечки превышает допустимое значения за счет некомпенсированных высших гармоник, что существенно ограничивает область применения преобразователя.

Для повышения эффективности компенсации необходимо учесть следующее. Принцип действия дроссельного компенсатора основан на вычитании индуктивной проводимости компенсатора из емкостной проводимости фаз сети в процессе резонанса. При этом должны соблюдаться условие $X_L = -X_C$, где X_L и X_C – соответствующие реактивные сопротивления компенсатора и изоляции сети. Так как при увеличении частоты реактивное сопротивление дросселя компенсатора увеличивается, а емкости сети уменьшается, полная компенсация возможно только при одной фиксированной частоте. Для полной компенсации в широком диапазоне частот необходимо соблюдение условия $X_k = -X_C$ при любой частоте емкостных токов утечки. Иными словами, проводимость компенсатора должна соответствовать проводимости емкости сети с отрицательным знаком при любой частоте тока утечки. Таким образом, устройство

компенсации емкостной проводимости должно представлять собой двухполюсник, комплексное сопротивление которого должно быть равно эквивалентному емкостному сопротивлению сети взятого с обратным знаком. Реализация такого двухполюсника возможна, в частности, с помощью, конвертора отрицательного сопротивления [2] (КОС). КОС инвертирует знак сопротивления, которое подключается к нему в качестве нагрузки, а также может изменять его модуль (рис.1а), где K_N – коэффициент конверсии, отрицательный безразмерный и не ограниченный по величине.

Параметры четырехполюсника, эквивалентного КОС, характеризуется двумя следующими уравнениями (рис.1б):

$$i_2 = K_{ni} i_1; \quad V_{e2} = K_{ne} V_{e1},$$

где $K_N = K_{ni} / K_{ne}$ – величина отрицательная.

$$Z_e = V_{e1} / i_1 \quad \text{и} \quad Z_L = V_{e2} / i_2$$

$$\frac{Z_e}{Z_L} = \frac{V_{e1}}{i_1} \frac{K_{ni} i_1}{K_{ne} V_{e1}} = \frac{K_{ni}}{K_{ne}};$$

$$Z_e = K_N Z_L = \frac{K_{ni}}{K_{ne}} Z_L.$$

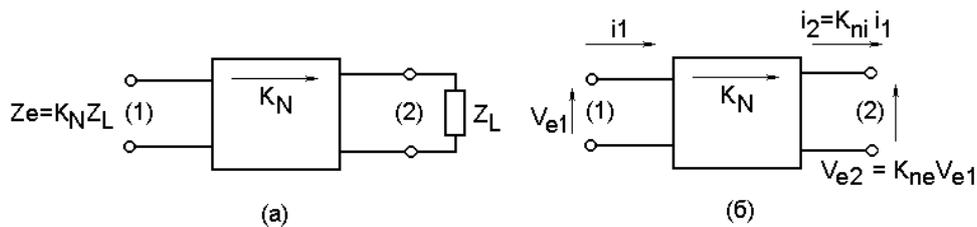


Рисунок 1 – Конвертор отрицательного сопротивления

При условии, что в данных уравнениях $K_{ni} = +1$, КОС характеризуется как конвертор сопротивления отрицательного по напряжению - КОСН, так как токи на входе и выходе конвертора одинаковы, а напряжения различны (рис.2).

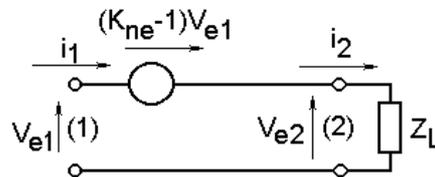


Рисунок 2 – Эквивалентная схема КОСН

Таким образом, для КОСН справедливо:

$$i_1 = i_2; \quad V_{e2} = K_{ne} V_{e1},$$

где $K_{ne} < 0$,

$$Z_e = \frac{V_{e1}}{i_1} = \frac{Z_L}{K_{ne}}.$$

В частном случае, при $K_{ne} = -1$, получим $Z_e = -Z_L$.

В этом случае, при подключении двухполюсника (Рис 2.) параллельно емкости сети и при выполнении условия $|-Z_L| = Z_c$, (где Z_c - емкостное сопротивление сети относительно земли) емкостная проводимость сети компенсируется. Как видно из Рис. 3, абсолютная величина емкостной проводимости сети $1/Z_c$ и проводимости двухполюсника $1/-Z_L$ одинаково увеличивается с ростом частоты. А так, как знаки у них противоположны, то их сумма и результирующая проводимость будет стремиться к нулю при любой частоте рабочего напряжения или его гармоник.

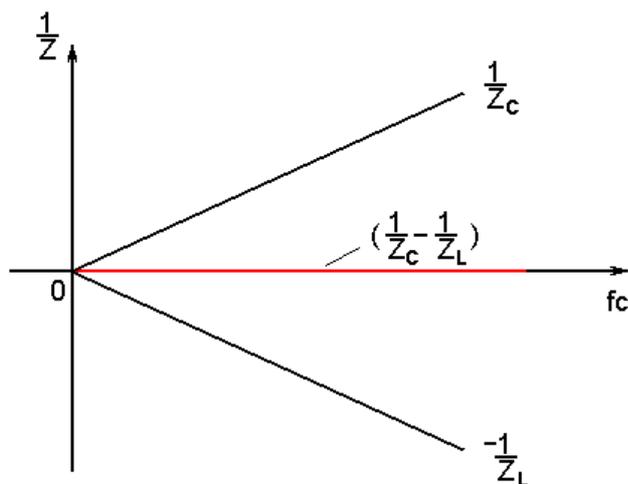


Рисунок 3 – Результирующая зависимость емкости сети и проводимости КОСН от частоты

Для разработки и исследования параметров компенсатора проведено компьютерное моделирование при помощи пакета программ схемотехнического моделирования «Electronics Workbench».

Модель компенсатора (рис.4) состоит из КОСН на операционном усилителе А1, емкости С1, высоковольтного каскада А2. В модели проводимость емкости С1 конвертируется и на выходе двухполюсника 1, 2 образуется отрицательная емкость, подключенная к конденсаторам присоединения Сп к фазам сети.

Исследования, проведенные при помощи данной модели показали принципиальную возможность применения данного схемного решения в системе компенсации для сетей с переменной частотой рабочего напряжения, а также для сетей с рабочим напряжением содержащим несколько гармоник кратных и не кратных рабочей частоте.

Переходный процесс изменения напряжения, приложенного к телу человека представлен на рис.6. Его параметры практически не зависят от частоты рабочего напряжения и, в основном, определены быстродействием устройства. Для сетей 380 - 1140В, количество электричества, проходящего через нагрузку в 1кОм за период времени 0,5 с, не превышает 15 мА*с при изменении частоты рабочего напряжения от 0 до 150 Гц и емкости сети от 0,1 до 1,5 мкФ/фазу, что полностью соответствует требованиям безопасности.

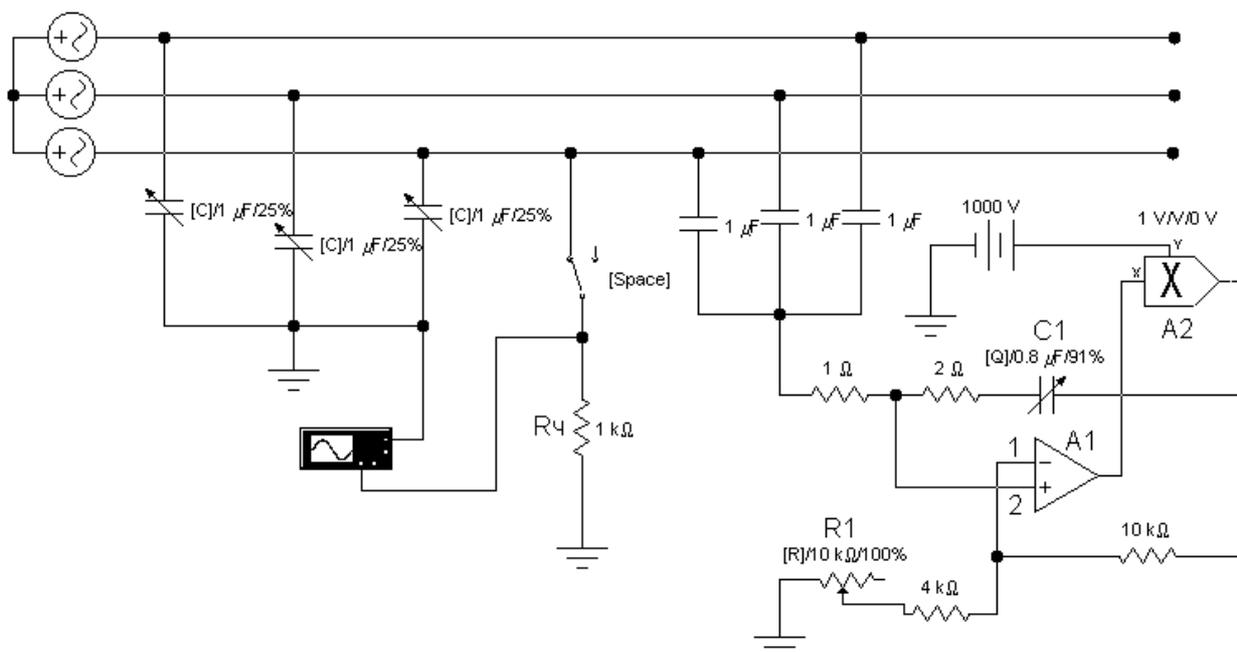


Рисунок 4 – Модель для исследования системы компенсации емкостной составляющей токов утечки

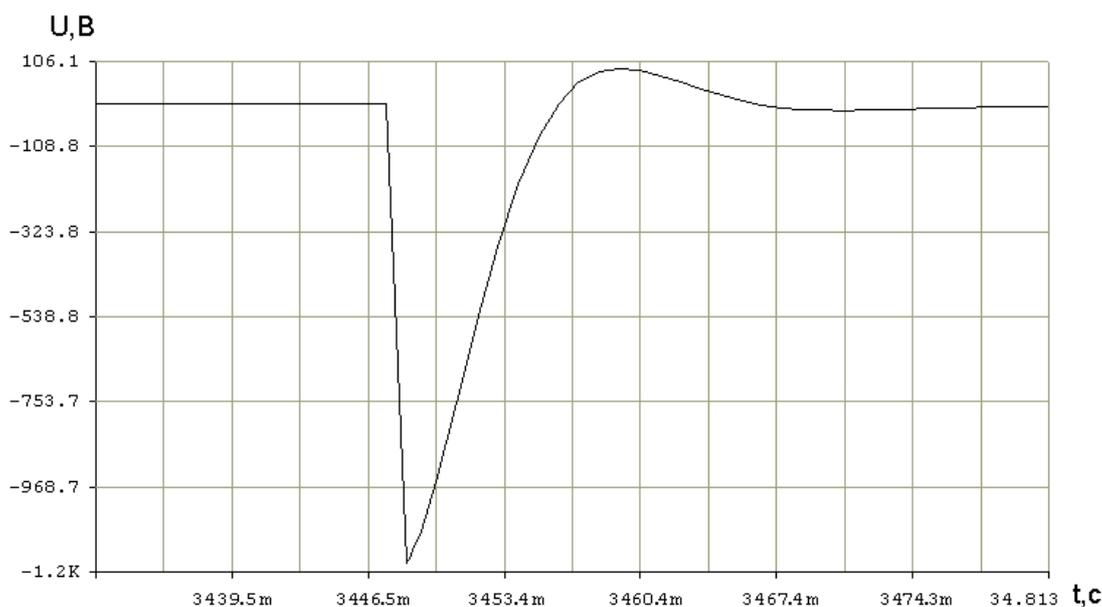


Рисунок 6 – Осциллограмма переходного процесса при внезапном касании человека фазы сети с КОСН

Список источников.

1. Щуцкий В.И., Бабокин Г.И., Ставцев В.А. Повышение надежности и безопасности электромеханических систем с преобразователями частоты. - М.: НЕДРА, 1996. – 169с.
2. Марше Ж. Операционные усилители и их применение. Пер. с франц. Л., «ЭНЕРГИЯ», 1974. – 216 с