

ДРОССЕЛИ В СИСТЕМАХ ФИЛЬТРОВ ВЫСШИХ ГАРМОНИК

Мирослав Лукевски¹

¹ ELHAND TRANSFORMATORY, e-mail: m.lukiewski@elhand.com.pl

Значительный уровень высших гармоник в промышленных и городских электроэнергетических сетях вызван быстрым ростом количества преобразователей и нелинейных приёмников. Деформация синусоиды напряжения приводит к увеличению потерь, а в крайних ситуациях даже к нарушениям работы машин и оборудования. С целью ограничения отрицательного влияния нелинейных приёмников и преобразователей на электроэнергетическую сеть, на питаемые из неё машины и на соединённые с сетью конденсаторные батареи применяются системы фильтров высших гармоник.

Фирма ELHAND TRANSFORMATORY из Люблинца производит дроссели типа ED3F, предназначенные для работы в системах фильтров LC высших гармоник.

ЗАДАЧИ ФИЛЬТРОВ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СЕТЯХ

В наиболее часто встречаемых системах трёхфазных мостовых преобразователей (шестипульсирующие системы) протекание тока с первичной стороны трансформатора – при условии симметрии питающих напряжений, коммутационных полных сопротивлений и углов запаздывания выключения тиристоров – кроме основной составляющей будет содержать гармоники, минимум: 5, 7, 11, 13, номера которых определяются по формуле (1).

$$n = kp \pm 1, \quad (1)$$

где: n – порядок гармоники, k – натуральное число, p – число пульсаций выпрямленного напряжения.

Значения амплитуд гармонических составляющих можно определить, используя уравнение (2).

$$A_n = \frac{1}{n} A_1, \quad (2)$$

где: A_1 – Амплитуда основной гармоники напряжения, A_n – амплитуда n -ой гармоники.

Чрезмерно большое содержание высших гармоник тока питания может вызвать значительное увеличение потерь мощности в устройствах и машинах, работающих совместно с преобразователями, в результате протекания тока повышенной частоты или вызвать нарушения в работе устройств путём искажения напряжения питания. Особенно, это относится к конденсаторным батареям, работающим параллельно с преобразовательной системой. Уменьшение полного сопротивления конденсаторов вместе с увеличением частоты может вызвать повреждение батареи в результате перегрузки токами с частотами высших гармоник.

Кроме того, опасным явлением является параллельный резонанс в системе. Гармоники, создаваемые бесступенчатыми приводными системами, могут быть усилены даже в 10-15 раз в цепи параллельного резонанса, образованного ёмкостным реактивным сопротивлением конденсаторной батареи и индуктивностью сети. Это

ELHAND TRANSFORMATORY

явление может привести к повреждению как конденсаторной батареи, так и преобразователя.

Гармонические составляющие при невыгодных условиях могут представлять опасность для механической конструкции электрических машин. Пары гармоник, например 5 и 7, могут вызвать механические колебания с частотой 6-той гармоники в генераторе или двигателе. Эти колебания возникают из-за колебаний вращающего момента в результате искажения кривой напряжения питания. Когда частота этих колебаний совпадёт с частотой механического резонанса, тогда механическая конструкция машины будет подвержена значительным перегрузкам.

Обременительный эффект шумной работы электрических машин, являющийся результатом явления магнитострикции, дополнительно усиливается из-за относительно высоких частот гармонических составляющих тока. Токи, искажённые содержанием высших гармоник, вызывают, кроме того, более интенсивное нагревание электроэнергетических проводов и кабелей в результате явления поверхностного эффекта и эффекта близости.

Роль фильтров LC, элементами которых являются дроссели типа ED3F, заключается в ограничении отрицательного влияния высших гармоник тока на электроэнергетическую сеть и на все устройства, присоединённые к ней.

На рисунке 1 приведена типовая схема для компенсации реактивной мощности и фильтрации гармоник. Здесь имеют место три фильтрующие ветви, относящиеся к 5, 7, 11-ой гармоникам. Количество устраиваемых фильтрующих ветвей зависит от требуемой реактивной мощности, необходимой для компенсации, а также от измерений и точного анализа содержания конкретных гармоник в сети.

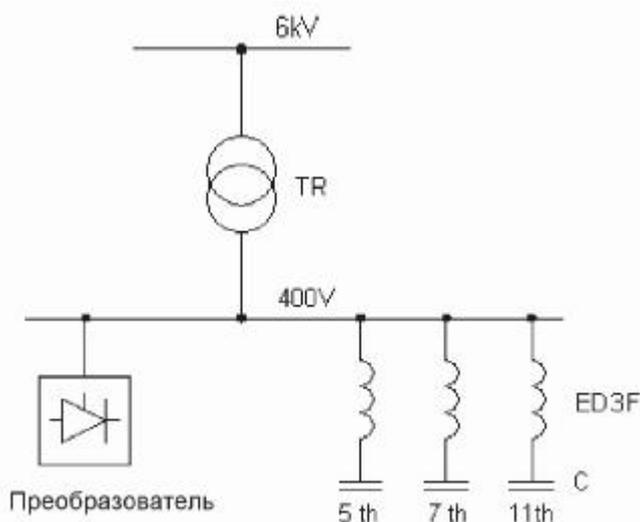


рис1. Упрощённая схема цепи компенсации реактивной мощности и фильтрации гармоник [на основании литературных источников].

Фильтры – это последовательные резонансные системы LC, параллельно подключенные к цепи питания преобразователя, которые исполняют двойную роль: компенсируют реактивную мощность, потребляемую приводной системой, и предотвращают проникновение высших гармоник в электрическую сеть. Реактивное сопротивление фильтра, в зависимости от номера гармоники, составляет (3).

$$X_{nf} = n\omega L_f - \frac{1}{n\omega C_f}, \quad (3)$$

где: L_f, C_f – индуктивность и ёмкость ветви цепи, представляющей фильтр; n – порядок гармоники; ω – пульсация [5,6].

ELHAND TRANSFORMATORY

При надлежащим образом подобранных величинах индуктивности и ёмкости, фильтр для основной гармоники и для гармоник низших чем n_r (резонансная частота) порядков, будет являться емкостной нагрузкой, а для всех гармоник высших порядков – индуктивной нагрузкой. Для резонансной частоты ветвь LC будет иметь небольшое полное сопротивление, равное в принципе активному сопротивлению обмоток дросселя. Ток с резонансной частотой будет замыкаться между преобразователем и фильтром, не попадая в сеть питания. Для основной гармоники ветви фильтра всегда имеют емкостной характер, что в практике означает реализацию компенсации реактивной мощности (рис.2)[2].

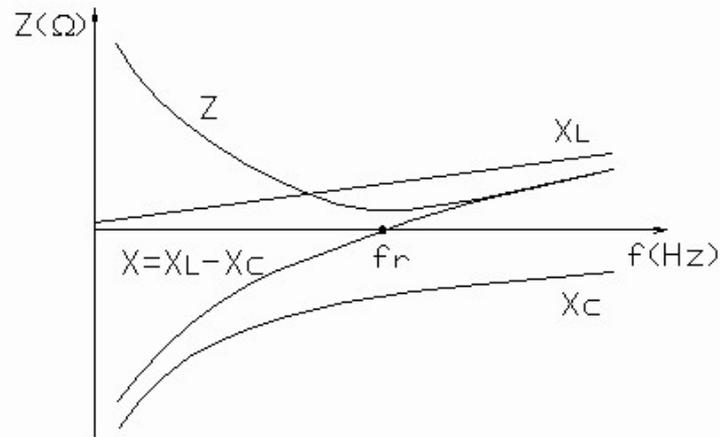


рис2. Характеристика полного сопротивления фильтра LC [1].

Разновидностью дросселей типа ED3F являются успокаивающие дроссели для защиты конденсаторной батареи. Эксплуатационные свойства этих дросселей характеризуются коэффициентом успокоения $p(\%)$. Значение коэффициента успокоения можно определить по формуле (4).

$$p(\%) = 100 \cdot \frac{U_L}{U_C} = 100 \cdot \left(\frac{f}{f_r} \right)^2 \quad (4)$$

где: U_L, U_C – напряжение индуктивности и ёмкости ветви LC,
 f – сетевая частота f_r – резонансная частота.

Наиболее часто выпускаются дроссели с коэффициентами успокоения $p=7\%$ и $p=5\%$, что соответствует резонансным частотам соответственно $f_r=189\text{Гц}$ и $f_r=223\text{Гц}$ (рис3). Дроссели с такими коэффициентами успокоения применяются повсеместно в компенсационных системах, в которых пятая и седьмая гармоники достигают опасно высокого уровня. В системах со значительным содержанием третьей гармоники, применяются дроссели с коэффициентом успокоения $p=14\%$, что соответствует резонансной частоте $f_r=133\text{Гц}$.

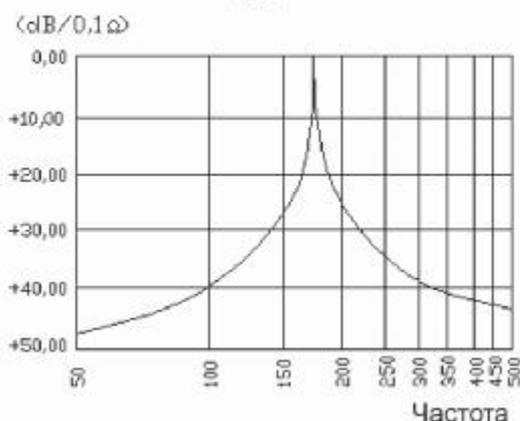


рис3. Характеристика успокоения системы LC с защитным дросселем с коэффициентом $p=7\%$. [на основании литературных источников].

ПРИМЕРЫ ИСПОЛНЕНИЯ ИНЕРТНЫХ ФИЛЬТРОВ LC

Существует большое количество технических решений промышленного применения, однако, наиболее часто используются инертные фильтры LC (рис.4).

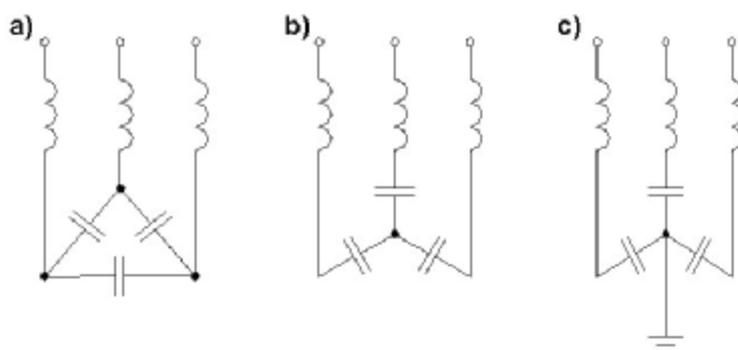


рис4. Примеры схем инертных фильтров LC [на основании литературных источников].

Ветви фильтра LC, представленного на (рис.4а), во время работы находятся под напряжением проводимости сети. В связи с этим, конденсаторные батареи и дроссели будут в этом случае, особенно в диапазоне средних напряжений, значительно дороже, чем в схемах (рис.4б,с). Поэтому конфигурация фильтра (рис.4а) применяется повсеместно в системах низкого напряжения. Недостатком этого решения является отсутствие возможности фильтрации тройных гармоник. Это является возможным только в схеме звезды с заземлённой нулевой точкой.

В схеме (рис.4б) значения напряжений на отдельных фазах фильтра зависят от ёмкости и индуктивности каждой ветви. В связи с необходимостью обеспечения регулярного рабочего напряжения во всех трёх фазах, необходимо обеспечить точную симметрию ёмкости и индуктивности. Схемы (рис.4а,б) могут применяться в произвольных системах трёхфазной сети. А схема (рис.4с) не может быть применена в сети с изолированной нулевой точкой или с нулевой точкой, заземлённой через успокаивающий дроссель. В такой схеме ветви фильтра работают практически при равных напряжениях ($U_p / \sqrt{3}$). В случае замыкания одной фазы

на землёю, в остальных ветвях появляется наименьшее линейное напряжение U_p . Это напряжение в $\sqrt{3}$ раза больше напряжения при нормальном состоянии работы. Конденсаторная батарея в этом случае должна быть очень быстро выключена ($t \leq 1$ мин.). А в сетях с изолированной нулевой точкой о замыканиях на землю в основном только поступает сигнал, замыкание длится значительно дольше, что является существенной опасностью для системы фильтров [1,2].

Параметры дросселей, предназначенных для работы в системах фильтрации гармоник, находятся соответственно в пределах от десятых частей до нескольких миллигенри и от нескольких до нескольких сотен ампер. Эти параметры зависят исключительно от схемы фильтра, ёмкости и мощности конденсаторной батареи, совместно с которой дроссель будет работать. Стержень дросселя изготавливается из электротехнической кремнистой жести толщиной (0,25 – 0,5) мм. Обмотки выполнены из обмоточного провода, круглого или профильного, навиты на каркасах и размещены на сердечнике. После закрытия сердечника всё подвергается вакуумной импрегнации, которая успешно защищает дроссель от воздействия климатических факторов. После оснащения дросселя выводами или кабельными башмаками, а также механическим оборудованием, готовое устройство подвергается серии тестов на электрической испытательной станции. Эти испытания выявляют все возможные недостатки изделия, которые могли остаться незамеченными в процессе производства. Все работы, начиная от приобретения материалов, используемых для изготовления, и кончая отправкой готового изделия, производятся в соответствии с процедурами системы обеспечения качества ISO-9002, что гарантирует наивысшее качество выпускаемых машин и оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ханзелька З., Клемпка Р. *Инертные фильтры высших гармоник* Приводы и управление № 9,10 2000г.
- [2] Нартовски З. *Конденсаторные батареи для компенсации реактивной мощности*. НТИ Варшава 1967г.
- [3] Барлик Р., Новак М. *Тиристорная техника* НТИ Варшава 1994г.
- [4] Новак М., Барлик Р. *Справочник инженера-электроэлектроника* НТИ Варшава 1998г.
- [5] Кучевски З. *Энергоэлектроника* НТИ Варшава 1980г.
- [6] CIRCUTOR – *Filtering reactors* каталог 2000г.