

УДК 621.3

Фильтры нелинейных искажений в системе электроснабжения

Панасюк Е.М., Ракуевич А.О., Лойко А.Ю.

Научный руководитель – к.т.н., доцент КОНСТАНТИНОВА С.В.

Система электроснабжения является неотъемлемой частью промышленного производства. Основной её задачей является бесперебойное обеспечение качественной электрической энергией потребителей. В настоящее время современное оборудование имеет нелинейные вольтамперные характеристики. Наличие таких потребителей приводит к искажению формы потребляемого тока. Искажение тока приводит к появлению реактивных составляющих мощности, которые необходимо компенсировать, что в свою очередь увеличивает затраты потребителя на электроэнергию.

Нелинейные свойства электромагнитных систем обусловлены следующими факторами:

1. Нелинейными сопротивлениями, емкостями или индуктивными элементами;
2. Гистерезисом в ферромагнитных материалах;
3. Нелинейными активными элементами, подобными вакуумным лампам, транзисторам и диодам;
4. Эффектами, характерными для движущихся сред;
5. Электромагнитными силами.

Изначально входящий ток имеет синусоидальную форму, но под действием нелинейных нагрузок форма тока сильно искажается, что показано на рисунке 1.

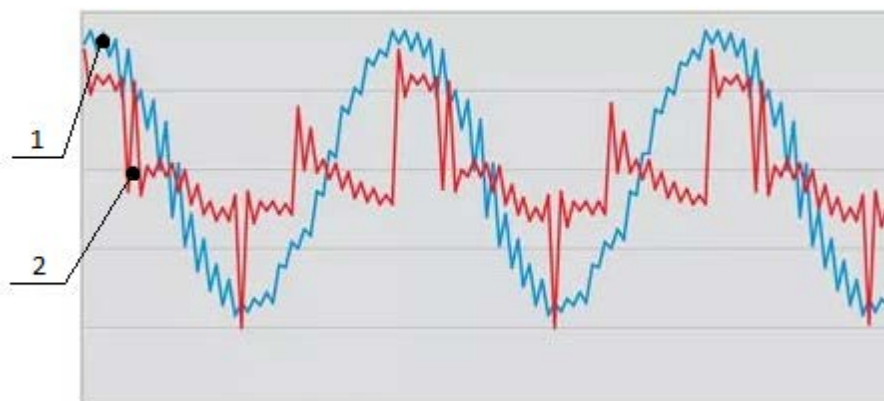


Рисунок 1 – Диаграмма : 1 - исходный сигнал, 2 - искаженный сигнал.

Искаженный ток в системах электроснабжения в свою очередь вызывает следующие последствия:

1. Ухудшение электромагнитной совместимости оборудования;
2. Увеличение потерь энергии в системе;
3. Повышение вероятности возникновения резонансных явлений в энергосистеме;
4. Нарушение работы устройств релейной защиты и автоматики;
5. Ускорение старения изоляции;
6. Увеличение значения действующего тока и тепловых потерь;
7. Сокращение срока службы электрооборудования.

В идеальной электроэнергетической системе энергия должна передаваться при номинальных значениях частоты и напряжения, не изменяющихся во времени. В жизни же эти условия не выполняются, поскольку большинство потребителей электроэнергии имеют нелинейные характеристики.

В отечественной энергетике существует проблема хаотичного подключения потребителей – включение в сеть мощных нелинейных нагрузок выполняется без корректирующих устройств, в результате чего электрические сети оказались перенасыщенными искажающим оборудованием. В отдельных регионах сформировались уникальные по своей мощности и степени искаженности кривых тока и напряжения комплексы электрических сетей энергосистем и распределительных сетей потребителей, что существенно обострило проблему электроснабжения потребителей качественной электроэнергией.

Так как изменение структуры или создание новой сети очень затратно, включение в сеть корректирующих устройств позволяет заметно улучшить качество энергии с наименьшими финансовыми затратами. Одними из самых эффективных корректирующих устройств являются фильтры.

Фильтр — это частотно-избирательное устройство, которое пропускает сигналы определенных частот и задерживает или ослабляет сигналы других частот. Фильтры могут быть классифицированы по ряду признаков:

1. По виду амплитудно-частотной характеристики они разделяются на фильтры нижних частот, фильтры верхних частот, полосовые фильтры, режекторные (заграждающие) фильтры. В отдельную группу могут быть выделены фазовые фильтры;
2. В зависимости от полиномов, используемых при аппроксимации передаточной функции различают фильтры критического затухания, Бесселя, Баттерворта, Чебышева;
3. По элементной базе фильтры разделяются на пассивные и активные фильтры.

Идеальный фильтр подавления гармоник — это устройство, которое способно полностью устранить реактивную составляющую тока за счет удаления гармоник и коррекции фазы основной гармоники тока. В результате этот тип фильтра преобразует несинусоидальный сетевой ток в синусоидальный ток и, таким образом, нелинейную нагрузку — в линейную, потребляющую только активную составляющую. Если дополнительно предположить, что фильтр работает без потерь, активная мощность от сети не изменится от его присутствия, а активная составляющая не увеличится.

Наиболее распространёнными пассивными фильтрами являются LC -фильтры, состоящий только из пассивных элементов, таких как катушек индуктивности и конденсаторов. В LC -фильтр могут входить также и резисторы.

На рисунке 2 показан простейший LC -фильтр нижних частот: при подаче сигнала определенной частоты на вход фильтра, напряжение на выходе фильтра определяется отношением реактивных сопротивлений катушки индуктивности и конденсатора.

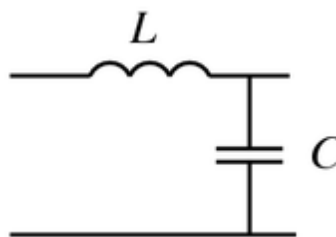


Рисунок 2 – LC -фильтр.

Делитель напряжения — устройство, в котором входное и выходное напряжение связаны коэффициентом передачи. С помощью него можно вычислить коэффициент передачи K фильтра низких частот:

$$K = \frac{Z_C}{Z_L + Z_C}, \quad (1)$$

где Z_L – сопротивление катушки индуктивности; Z_C – сопротивление конденсатора:

$$Z_L = j * X_L; Z_C = -j * X_C. \quad (2)$$

Для получения частотно-зависимого коэффициента передачи подставим значения сопротивлений:

$$K(\omega) = \frac{1}{1-\omega^2 LC} = \frac{1}{1-(\omega/\omega_0)^2}. \quad (3)$$

Из этого следует, что коэффициент передачи ненагруженного идеального фильтра низких частот неограниченно растет с приближением к частоте ω_0 , а затем убывает. На очень низких частотах коэффициент передачи фильтра низких частот близок к единице, на очень высоких — к нулю. Зависимость модуля комплексного коэффициента передачи фильтра от частоты называют амплитудно-частотной характеристикой, а зависимость фазы — фазо-частотной характеристикой.

Для предотвращения острого резонанса амплитудно-частотной характеристики вблизи частоты ω_0 на практике к выходу фильтра подключается активная нагрузка. Это также приводит к понижению добротности фильтра. Характеристическим сопротивлением фильтра называется величина ρ , выраженная следующей зависимостью:

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Фильтр низких частот, нагруженный на сопротивление, равное характеристическому, имеет нерезонансную амплитудно-частотную характеристику, примерно постоянную для частот $\omega < \omega_0$, и убывающую как $1/\omega^2$ на частотах выше ω_0 . Поэтому, частоту ω_0 называют частотой среза.

LC-фильтр верхних частот строится аналогично. В схеме фильтра высоких частот меняются местами катушка индуктивности и конденсатор. Для ненагруженного фильтра высоких частот получается следующий коэффициент передачи:

$$K(\omega) = -\frac{(\omega/\omega_0)^2}{1-(\omega/\omega_0)^2}. \quad (4)$$

На очень низких частотах модуль коэффициента передачи фильтра высоких частот близок к нулю. На очень высоких — к единице.

Главное преимущество пассивных фильтров перед активными является их относительная дешевизна, однако необходимо длительно и тщательно анализировать сети при проектировании для выбора правильного решения, что, безусловно, является недостатком пассивных фильтров. Так же существует опасность перегрузки из-за увеличения нагрузки с повышенным содержанием гармоник и появления других источников искажений.

Пассивные фильтры имеют ограниченные возможности в отношении уменьшения сигналов на высоких частотах, то есть чем выше порядок гармоники, тем ниже эффективность фильтра. Кроме того, не так просто компенсировать гармоники в случае динамических изменений гармонических искажений.

На сегодняшний день ведутся разработки систем компенсации неактивных составляющих мощности на основе активных фильтров. Такие системы являются наиболее перспективными. В активном фильтре присутствуют один или несколько активных элементов, таких как транзистор или операционный усилитель. Система управления анализирует гармонические составляющие потребляемого тока, после чего активный фильтр инжектирует в сеть ток, находящийся в противофазе с анализируемым.

Активные фильтры подразделяются на последовательные, параллельные и гибридные. Но для защиты сети преимущественно используются параллельные.

Ввод в эксплуатацию активных фильтров в систему электроснабжения позволит:

1. Поддержание синусоидальной формы тока и напряжения в сети;
2. Компенсировать реактивные составляющие полной мощности;
3. Увеличить срок службы электрооборудования на 20-30%;

4. Снизить потери в электрооборудовании до 20%.

Кроме того, использование активных фильтров позволяет достичь наилучшей электромагнитной совместимости нелинейного потребителя с сетью электроснабжения, что безусловно повышает качество электроэнергии и стабильное функционирование энергосистемы в целом.

Литература

1. Электрический фильтр: [Электронный ресурс]. 2010. URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1209222#>. (Дата обращения: 08.11.2017.).
2. Мещеряков В.Н., Шеин М.А. Активная фильтрация высших гармонических составляющих тока в трехфазных электрических. // Вести высших учебных заведений черноземья – 2010 - №1(19) – с.35-10.
3. Чумаков С.А., Малашин А.Н., Суходолов Ю.В. Обеспечение качества электрической энергии в системах электроснабжения автономных образцов оружия. // Белорусский национальный технический университет, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ». – Минск : БНТУ, 2014. – С. 42 - 46.