

## УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Шевченко Е. С., Буянкин П. Д.,  
научный руководитель д-р.техн. наук Довгун В. П.  
*Сибирский федеральный университет*

Широкое применение импульсных преобразователей и энергосберегающих систем освещения вызвало значительное ухудшение качества электрической энергии в распределительных сетях низкого напряжения. Проблема обеспечения качества электроэнергии весьма актуальна для систем электроснабжения городов и небольших населенных пунктов. В ряде случаев коэффициент искажения синусоидальной формы кривой тока может достигать 25-30 % [1]. Очевидно, что эта проблема имеет важное значение и для систем распределенной генерации, а также автономных систем электроснабжения.

Одним из вариантов улучшения качества электроэнергии в сетях распределенной энергии является использование активных силовых фильтров (АФ) [2, 3]. Однако использование АФ не всегда экономически оправдано, поскольку они имеют высокую стоимость. Более эффективным решением является объединение преобразователя энергии с АФ. В данном случае преобразователь энергии поддерживает передачу энергии между возобновляемыми источниками энергии и локальной сетью, а также улучшает качество электроэнергии в точке общего присоединения.

Другим экономически эффективным решением является использование гибридных силовых фильтров, состоящих из активного и пассивного фильтров. Одним из преимуществ гибридных силовых фильтров является снижение мощности активного фильтра.

Существуют различные структуры гибридных силовых фильтров, отличающиеся способом соединения активной и пассивной частей.

В докладе рассмотрены следующие конфигурации гибридных силовых фильтров гармоник:

1. Гибридный силовой фильтр, образованный параллельно соединенными пассивным и активным фильтрами. Активный фильтр управляется напряжением  $U_{мон}$  в точке общего присоединения;

2. Гибридный силовой фильтр, образованный последовательно соединенными пассивным и активным фильтром, управляемым током сети  $I_c$ .

3. Комбинированный гибридный фильтр с параллельным пассивным фильтром и последовательным активным фильтром, управляемым током сети  $I_c$ .

Рассмотрим подробнее перечисленные конфигурации гибридных фильтров.

*А. Гибридный силовой фильтр с параллельно соединенными пассивным и активным фильтрами, управляемый напряжением  $U_{мон}$  в точке общего присоединения.*

Эта топология показана на рисунке 1. Сеть представлена источником синусоидального напряжения, соединенного последовательно с сопротивлением сети  $Z_c = R_c + j\omega L_c$ . Нелинейная нагрузка представлена как источник гармонического тока.  $I_n$  это гармонический ток нелинейной нагрузки, и  $I_c$  это гармонический ток сети. Пассивный фильтр настроен на 5-ю и 7-ю гармоники. Активный фильтр моделируется источником тока, который генерирует компенсирующий ток, пропорциональный

гармоническим составляющим напряжения  $U_{mon}$  в точке общего присоединения:  
 $I_{aф} = G_{aф} U_{mon}$ .

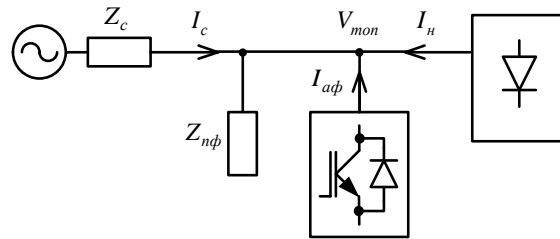


Рис. 1. Топология гибридного силового фильтра с параллельно соединенными пассивным и активным фильтрами, управляемый напряжением  $U_{mon}$  в точке общего присоединения

Из рисунка 1 следует, что напряжение в точке общего присоединения и ток сети может быть выведено в зависимости от гармонического тока нелинейной нагрузки  $I_n$ :

$$I_c = \frac{Y_c}{Y_c + Y_{нф} + G_{aф}} I_n ; U_{mon} = \frac{1}{Y_c + Y_{нф} + G_{aф}} I_n \quad (1)$$

На рисунке 2 показаны частотные характеристики коэффициента передачи тока  $I_c/I_n$  и сопротивления  $U_{mon}/I_n$ .

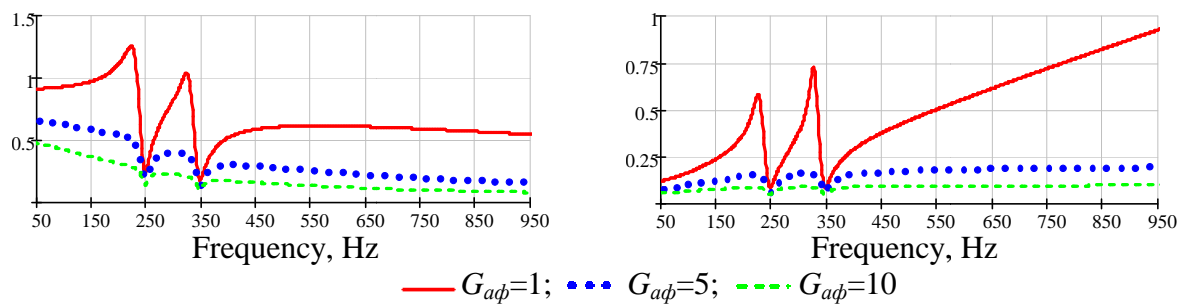


Рис. 2. Частотные характеристики гибридного силового фильтра с параллельно соединенными пассивным и активным фильтрами, управляемый напряжением  $U_{mon}$  в точке общего присоединения

Из уравнений (1) следует:

$$U_{mon} \approx 0, I_c \approx 0 \text{ if } G_{aф} \gg |Y_c + Y_{нф}|. \quad (2)$$

Если выполняется выражение (2), то ток и напряжение сети почти синусоидальны.

*В. Гибридный силовой фильтр с последовательно соединенными пассивным и активным фильтрами, управляемый током сети  $I_c$ .*

Эта топология показана на рисунке 3. Напряжение активного фильтра эквивалентно напряжению управляемого источника:  $U_{aф} = R_{aф} I_c$

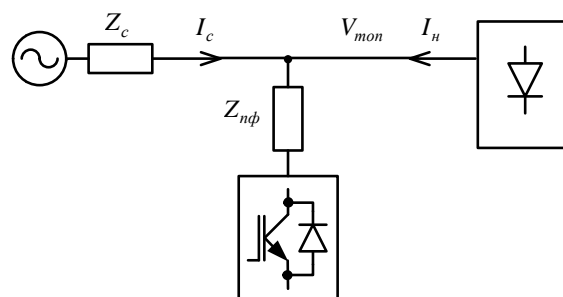


Рис. 3. Топология гибридного силового фильтра с последовательно соединенными пассивным и активным фильтрами, управляемый ток сети  $I_c$   
Ток сети и напряжение в точке общего присоединения:

$$I_c = \frac{Z_{n\phi}}{Z_{n\phi} + Z_c + R_{a\phi}} I_n; U_{mon} = \frac{Z_c Z_{n\phi}}{Z_{n\phi} + Z_c + R_{a\phi}} I_n.$$

На рисунке 4 показана частотная характеристика коэффициента передачи токов  $I_c/I_n$  и сопротивления  $U_{mon}/I_n$ .

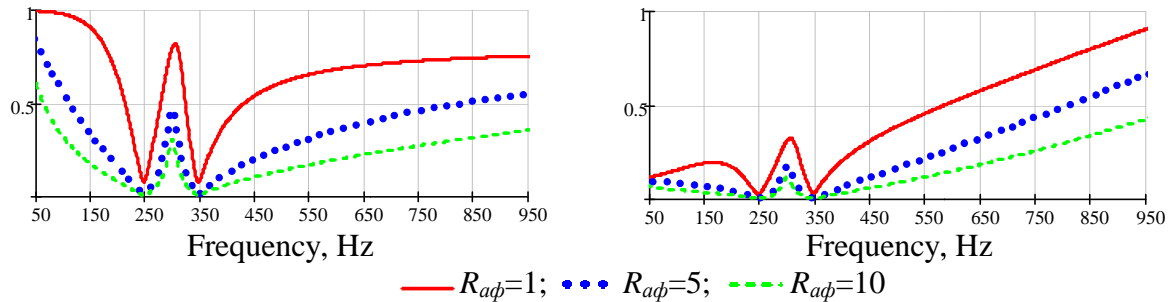


Рис. 4. Частотные характеристики гибридного силового фильтра с последовательно соединенными пассивным и активным фильтрами, управляемый ток сети  $I_c$

*С. Гибридный силовой фильтр с последовательно соединенным пассивным и параллельно соединенным активным фильтрами, управляемый ток сети  $I_c$ .*

Эта топология показана на рисунке 5. Компенсация напряжения активного фильтра пропорциональна гармоническим составляющим тока сети:  $U_{a\phi} = R_{a\phi} I_c$ .

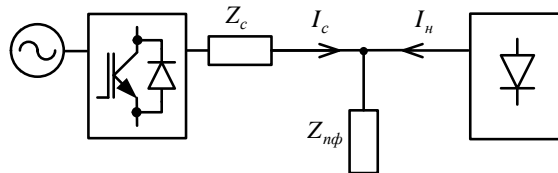


Рисунок 5 – Топология гибридного силового фильтра с последовательно соединенным пассивным и параллельно соединенным активным фильтрами, управляемый ток сети  $I_c$

Ток сети и напряжение в точке общего присоединения:

$$I_c = \frac{Z_{n\phi}}{Z_{n\phi} + Z_c + R_{a\phi}} I_n; U_{mon} = \frac{Z_{n\phi} (Z_c + R_{a\phi})}{Z_{n\phi} + Z_c + R_{a\phi}} I_n.$$

На рисунке 6 показана частотная характеристика коэффициента передачи токов  $I_c/I_n$  и сопротивления  $U_{mon}/I_n$ .

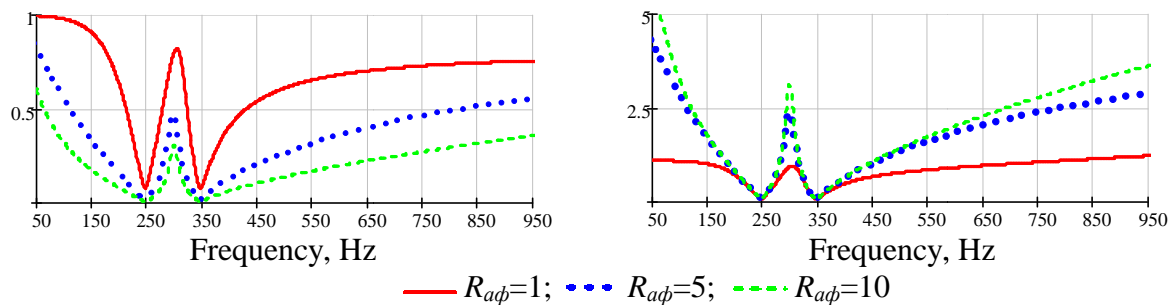


Рис. 6. Частотные характеристики гибридного силового фильтра с последовательно соединенным пассивным и параллельно соединенным активным фильтрами, управляемый током сети  $I_c$

Рассчитаем мощность фильтров по следующей формуле:

$$S = U_{mon} I_c,$$

где ток сети и напряжение в точке общего присоединения:

$$U_{mon} = \sqrt{\sum_k U_{monk}^2}; I_c = \sqrt{\sum_k I_{ck}^2}.$$

Мощность гибридного силового фильтра с параллельно соединенными пассивным и активным фильтрами:

$$\begin{aligned} \text{при } G_{a\phi}=1 & \quad S=1,603; \\ \text{при } G_{a\phi}=5 & \quad S=5,793; \\ \text{при } G_{a\phi}=10 & \quad S=8,625. \end{aligned}$$

Мощность гибридного силового фильтра с последовательно соединенными пассивным и активным фильтрами:

$$\begin{aligned} \text{при } R_{a\phi}=1 & \quad S=0,499; \\ \text{при } R_{a\phi}=5 & \quad S=11,573; \\ \text{при } R_{a\phi}=10 & \quad S=45,814. \end{aligned}$$

Из проведенного анализа мы видим что, компенсационные свойства гибридных фильтров гармоник зависят от схемы соединения активной и пассивной частей фильтра и от характера управляющей переменной. Это определяет и область применения рассмотренных структур. Все рассмотренные конфигурации гибридных фильтров эффективно ослабляют высшие гармоники тока, создаваемые нелинейной нагрузкой в точке общего присоединения. Однако по отношению к гармоникам напряжения, создаваемым внешней сетью, они ведут себя по-разному.

Последовательная схема с АФ, управляемым током, и комбинированная структура эффективны в тех случаях, когда необходимо ослабить гармоники тока сети, создаваемые как нелинейной нагрузкой, так внешними источниками.

Параллельную структуру с АФ, управляемым напряжением, целесообразно использовать в тех случаях, когда требуется ослабить распространение высших гармоник напряжения, генерируемых нелинейной нагрузкой и внешней сетью. Отметим, что параллельный активный фильтр, управляемый напряжением в точке подключения, впервые предложено использовать для компенсации распространения гармоник напряжения в радиальной сети в работах. Применение гибридной схемы позволяет уменьшить мощность активного фильтра и за счет этого удешевить компенсирующее устройство.

### Литература

1. Темербаев С. А., Боярская Н. П., Довгун В. П. Анализ качества электроэнергии в городских распределительных сетях 0,4кВ. – Журнал Сибирского федерального университета. Серия техника и технологии. 2013, № 1, с. 107-120.
2. De Lima Tostes M., Bezerra U., Silva R. Impacts over distribution grid from the adoption of distributed harmonic filters on low-voltage customers. IEEE transactions on power delivery, vol. 20, No. 1, 2005, pp. 384 – 389.

3. Довгун В. П., Темербаев С. А., Егоров Д. Э., Шевченко Е. С. Компенсационные характеристики гибридных фильтров гармоник. – Известия вузов. Проблемы энергетики. 2012, № 11-12, с. 72-80.