

# Коэффициент мощности

## и нагрузочная характеристика ШИМ-инвертора в системах бесперебойного питания

**В статье рассматриваются вопросы влияния коэффициентов мощности ШИМ-инверторов и нагрузки на основные характеристики преобразовательных устройств.**

**Валерий Климов  
Андрей Москалев**

vklimov@tensy.ru

Одна из современных структур системы с двойным преобразованием энергии (ДПЭ), используемая в источниках бесперебойного питания (ИБП), приведена на рис. 1 [1]. На рисунке условно изображено по одной фазе трехфазных выпрямителя и инвертора. Особенностью такой структуры является использование неуправляемого выпрямителя VD1, VD2 и регулятора повышенного напряжения (бустера) РН в звене постоянного тока. Дифференциальная схема бустера выполняется на двух IGBT-транзисторах VT1, VT2, диодах VD5, VD6, дросселях L1, L2 и накопительных конденсаторах C1, C2. Этот преобразователь выполняет следующие задачи:

- стабилизирует напряжение питания инвертора на уровне  $\pm 340 \dots 400$  В, необходимом для формирования номинальной величины выходного напряжения 220/380 В;
- обеспечивает балансировку напряжений положительной и отрицательной шин постоянного тока относительно нейтрали, что исключает появление постоянной составляющей в выходном напряжении.

ШИМ-инвертор в такой структуре представляет собой инвертор на IGBT-транзисторах VT3, VT4, которые управляются широтно-импульсными сигналами, модулированными по синусоидальному закону [2]. Выделение основной гармоники выходного напряжения обеспечивает выходной фильтр (L3, C3).

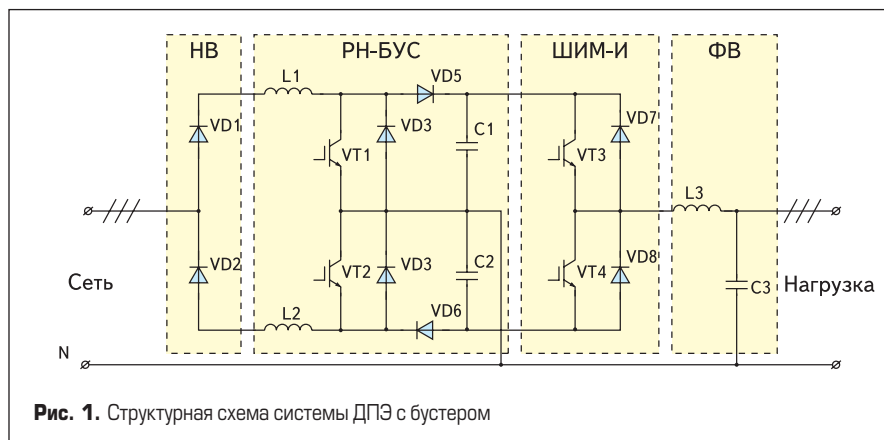


Рис. 1. Структурная схема системы ДПЭ с бустером

При оценке энергетических показателей систем с двойным преобразованием энергии в случае использования во входном каскаде неуправляемого (НВ) или управляемого (УВ) выпрямителя необходимо учитывать, что мы имеем дело с необратимым нелинейным четырехполюсником, содержащим звено постоянного тока, который разделяет первичный источник питания и нагрузку [3, 4]. По определению, коэффициент мощности является показателем, характеризующим влияние реактивной мощности и мощности искажения на энергетическую эффективность системы. Системы ДПЭ характеризуются двумя коэффициентами мощности: по отношению к сети — входным ( $K_{\text{рвх}}$ ) и по отношению к нагрузке — выходным ( $K_{\text{рвых}}$ ). В общем случае значения этих коэффициентов отличаются.

Составляющие токов реактивной мощности и мощности искажения во входной цепи преобразователя (мостовой схеме трехфазного выпрямителя) будут замыкаться во входном контуре системы и зависеть от параметров входного фильтра, реактивных параметров звена постоянного тока (так как это влияет на форму тока, потребляемого от сети) и степени загрузки системы.

Реактивная составляющая мощности и высокочастотные гармонические составляющие мощности искажения на выходе преобразователя будут обмениваться между нагрузкой, выходным фильтром инвертора и емкостью фильтра звена постоянного тока. Замыкаясь в указанном контуре силовой цепи преобразователя, они не проявляются во входной цепи системы, а их величины будут зависеть от коэффициента мощности нагрузки. Причем выходной коэффициент мощности может отличаться от коэффициента мощности нагрузки. При равенстве величин этих коэффициентов система будет отдавать максимальную полную мощность в нагрузку.

Введем понятия коэффициента передачи полной мощности в нагрузку и нагрузочной характеристики инвертора [3].

**Коэффициент передачи полной мощности в нагрузку** — отношение предельно допустимой мощности нагрузки к номинальной полной мощности оборудования:

$$K_s = (S_{\text{выхmax}}/S_{\text{ном}}) \times 100\%.$$

**Нагрузочная характеристика** — зависимость коэффициента передачи полной мощности от значения коэффициента мощности нагрузки:

$$K_s = f(K_{pн}).$$

Коэффициент  $K_s$  коррелируется с понятием **коэффициента снижения мощности**  $K_d$  (derating factor), указывающим на часть величины активной составляющей мощности нагрузки, которую можно подключить к инвертору. Коэффициент снижения мощности зависит от характера нагрузки. В таблице 1 приведен пример значений коэффициентов снижения мощности при выходном коэффициенте мощности инвертора 0,8 и различных значениях коэффициентов мощности нагрузки.

Таблица 1

| Характер нагрузки | Коэффициент мощности нагрузки | Коэффициент снижения мощности, % |
|-------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Индуктивный       | 0,7                           | 88                               |
|                   | 0,75                          | 94                               |
|                   | 0,8                           | 100                              |
|                   | 0,85                          | 100                              |
|                   | 0,9                           | 100                              |
| Резистивный       | 1,0                           | 100                              |
| Емкостной         | 0,95                          | 94                               |
|                   | 0,9                           | 87                               |
|                   | 0,85                          | 80                               |
|                   | 0,8                           | 74                               |
|                   | 0,75                          | 68                               |
|                   | 0,7                           | 62                               |

При емкостной нагрузке ток емкости выходного фильтра суммируется с емкостной составляющей тока нагрузки, что снижает предельно допустимую нагрузку на выходе инвертора.

Для наглядности обратимся к **векторной диаграмме мощностей** инвертора (рис. 2).

Верхний квадрант характеризует мощность при активно-емкостной нагрузке, а нижний — при активно-индуктивной нагрузке. Здесь приняты обозначения:

- горизонтальная ось соответствует относительным значениям активной мощности  $P$ ;
- $O$  — центр окружности максимальной полной мощности при индуктивном характере нагрузки;
- $OB$  — вектор максимальной полной мощности, отдаваемой в нагрузку индуктивного характера ( $S_{\text{макс}}$ ) при номинальной активной мощности;
- $O^1$  — центр окружности максимальной полной мощности при емкостном характере нагрузки;
- $O^1C$  — радиус окружности максимальной полной мощности, отдаваемой в нагрузку емкостного характера ( $S_{\text{макс}}$ );
- $BC$  — предельное значение активной мощности на выходе преобразователя ( $P_{\text{ном}}$ );
- $OA$  — предельное значение полной мощности, отдаваемой в индуктивную нагрузку, при пониженной активной мощности;
- $OD$  — предельное значение полной мощности, отдаваемой в емкостную нагрузку, при пониженной активной мощности;
- $OC$  — вектор полной мощности, отдаваемой в емкостную нагрузку при номинальной активной мощности;

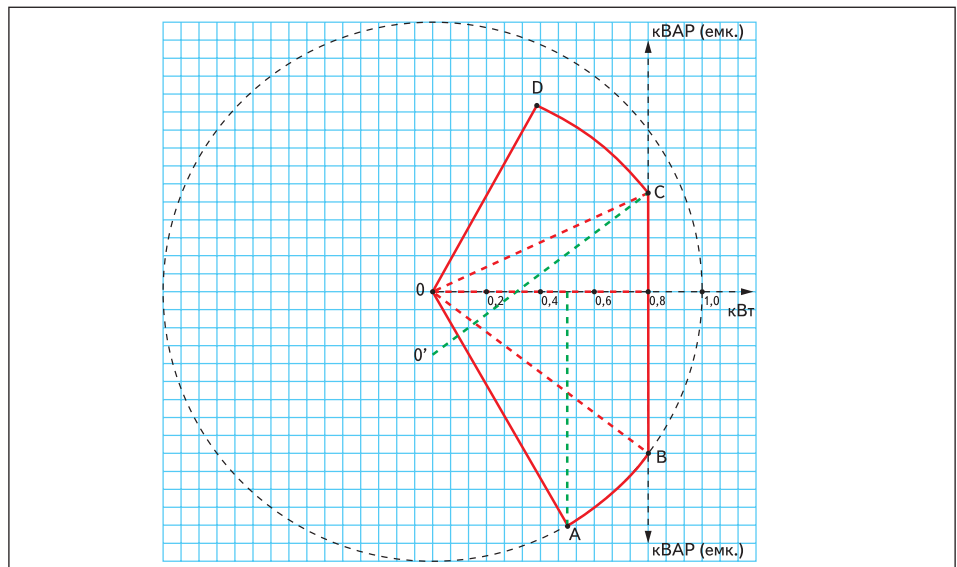


Рис. 2. Векторная диаграмма мощностей инвертора

- $CD$  — граница снижения полной мощности при емкостной нагрузке.

Косинусы углов поворота векторов полной мощности относительно действительной оси координат будут соответствовать коэффициентам мощности нагрузок на выходе инвертора. Положение линии номинальной активной мощности на выходе преобразователя ( $P_{\text{ном}}$ ) определяется выходным коэффициентом мощности инвертора

$$K_{P_{\text{вых}}} = P_{\text{ном}}/S_{\text{ном}}$$

При емкостном характере нагрузки происходит смещение центра максимальной полной мощности  $O^1$  вниз относительно начала координат  $O$ .

Выход за указанные границы на векторной диаграмме мощностей ( $A-B-C-D-O$ ) означает перегрузку инвертора. Современные системы управления инвертором в ИБП анализируют значения полной и активной составляющей мощностей, фиксируя превышения предельных значений. Вычисления текущих значений мощностей могут осуществляться с помощью DSP по следующим выражениям:

$$S = \sqrt{\frac{2}{N} \sum_{N/2}^N u_n^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_N i_n^2},$$

$$P = \frac{1}{N} \sum_N (\pm i_n u_n),$$

где:  $N$  — число дискрет измерения электрических величин за период основной частоты выходного напряжения инвертора;  $n$  — текущий номер дискреты.

Знак «+» в выражении для активной мощности принимается при совпадении знаков мгновенных значений тока и напряжения, а при их несовпадении принимается знак «-».

Значение  $N$  определяется частотой коммутации транзисторов ШИМ-инвертора  $F_k$ .

Период выборки может приниматься равным утроенному значению периода коммутации транзисторов:

$$T_n = 3/F_k.$$

Так, если  $F_k = 19,2$  кГц, то выбираем период выборки  $T_n = 0,15625$  мс, что соответствует  $N = 128$  на периоде основной частоты выходного напряжения инвертора 50 Гц.

**Нагрузочная характеристика инвертора** представляет нелинейную зависимость коэффициента передачи полной мощности от коэффициента мощности нагрузки. Значение коэффициента передачи полной мощности в нагрузку достигает 100% при равенстве коэффициента мощности линейной нагрузки индуктивного характера выходному коэффициенту мощности инвертора.

На рис. 3 приведены нагрузочные характеристики при различных характерах линейной нагрузки RL, RC и нелинейной нагрузки RCD. При нелинейной нагрузке коэффициент передачи мощности снижается. Наиболее распространены однофазные нелинейные нагрузки типа RCD — неуправляемые выпрямители с емкостным фильтром. Коэффициент амплитуды тока такой нагрузки достигает 2,5–3 при коэффициенте мощности 0,7–0,6. Коэффициент передачи мощности в нелинейную нагрузку  $K_s$  при токе с коэффициентом амплитуды  $K_a = 3$  не превышает значения 70–80%.

**Коэффициенты реактивных мощностей выходного фильтра инвертора** при выборе параметров фильтра рекомендуется принимать:  $K_C = 0,25... 0,5$ ;  $K_F = 0,07... 0,2$ .

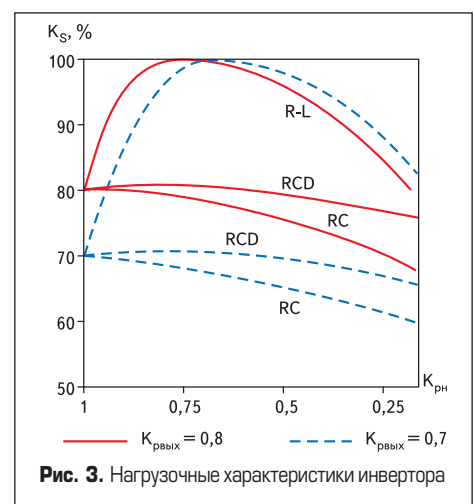


Рис. 3. Нагрузочные характеристики инвертора

Меньшие значения коэффициентов могут быть приняты для пониженных мощностей инверторов.

Рассмотрим в качестве примеров соотношения мощностей в инверторе для двух случаев:

- 1)  $S_n = 100$  кВА,  $K_p = 0,8$ ;
- 2)  $S_n = 20$  кВА,  $K_p = 0,7$ .

Примем для первого случая коэффициенты реактивных мощностей:  $K_c = 0,5$ ;  $K_l = 0,2$ .

Тогда значения реактивных мощностей выходного фильтра составят:

$$Q_{c\phi} = 0,5 \times 100 = 50 \text{ кВар},$$

$$Q_{l\phi} = 0,2 \times 100 = 20 \text{ кВар}.$$

При значении коэффициента мощности инвертора  $K_p = 0,8$  имеем номинальные активную и реактивную мощности нагрузки:

$$P_n = 0,8 \times 100 = 80 \text{ кВт},$$

$$Q_n = 0,6 \times 100 = 60 \text{ кВар}.$$

Значение полной расчетной мощности инвертора определится следующим образом:

$$S_{ин} = \sqrt{P_n^2 + (Q_{l\phi} + Q_n - Q_{c\phi})^2} =$$

$$= \sqrt{80^2 + 30^2} = 86 \text{ кВА}.$$

Во втором случае примем коэффициенты реактивных мощностей равными:  $K_c = 0,4$  и  $0,3$  при  $K_l = 0,1$ . Тогда имеем следующие значения мощностей:

Для  $K_c = 0,4$ :  $Q_{c\phi} = 0,4 \times 20 = 8$  кВар,  
 $Q_{l\phi} = 0,1 \times 20 = 2$  кВар,

$$P_n = 0,7 \times 20 = 14 \text{ кВт},$$

$$Q_n = 0,715 \times 20 = 14,3 \text{ кВар},$$

$$S_{ин} = \sqrt{P_n^2 + (Q_{l\phi} + Q_n - Q_{c\phi})^2} =$$

$$= \sqrt{14^2 + 8,3^2} = 16,25 \text{ кВА}.$$

Для  $K_c = 0,3$  имеем:  $Q_{c\phi} = 0,3 \times 20 = 6$  кВар, тогда:

$$S_{ин} = \sqrt{P_n^2 + (Q_{l\phi} + Q_n - Q_{c\phi})^2} =$$

$$= \sqrt{14^2 + 10,3^2} = 17,38 \text{ кВА}.$$

Таким образом, увеличение коэффициента емкостной мощности приводит к снижению расчетной мощности инвертора, обеспечивающего номинальные режимы работы в безопасной области векторной диаграммы мощностей.

## Литература

1. Климов В. П.. Современные направления развития силовых преобразователей переменного тока // Практическая силовая электроника. 2007. № 25.
2. Климов В., Москалев А. Трехфазные источники бесперебойного питания: схемотехника и технические характеристики // Электронные компоненты. 2005. № 8.
3. Климов В., Климова С. Энергетические показатели источников бесперебойного питания переменного тока // Электронные компоненты. 2004. № 4.
4. Воробьев А. Ю. Влияние ИБП на систему электроснабжения // Вестник связи. 2006. № 7.