

СРАВНЕНИЕ ДВУХ СПОСОБОВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ НАГРУЗКИ В ИНВЕРТОРАХ ФОРМИРОВАНИЯ ТОКА

В. И. ИВАНЧУРА, С. И. КОРОЛЕВ, Б. П. СОУСТИН

(Представлена научно-техническим семинаром кафедры электрооборудования)

В последнее время все большее применение находят инверторы с замкнутой системой формирования тока нагрузки [1, 2]. Ток в таком инверторе может иметь любую форму, в частном случае — синусоидальную. При синусоидальном токе на качественные характеристики инвертора в значительной мере сказывается способ компенсации реактивной энергии нагрузки; к характеристикам инвертора в первую очередь следует отнести частоту переключения силовых элементов f_k при заданной величине погрешности воспроизведения тока ΔI .

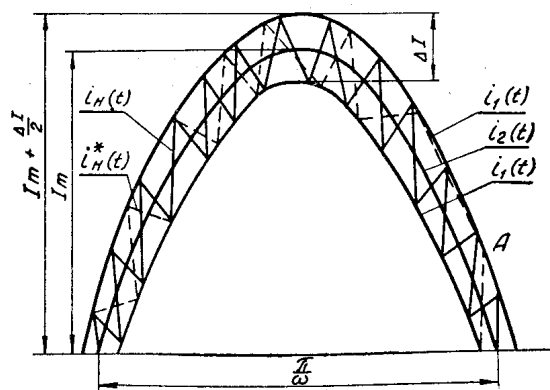


Рис. 1.

Ток нагрузки $i_n(t)$ колеблется между двумя синусоидами (рис. 1) — верхней $i_3(t) = I_m \sin \omega t + \frac{\Delta I}{2}$ и нижней $i_1(t) = I_m \sin \omega t - \frac{\Delta I}{2}$, , переходя через ноль в момент $\omega t = 0$ и $\omega t = \pi$. В момент $\omega t = 0$ включаются транзисторные или тиристорные ключи T_1 и T_2 (рис. 2) и ток в нагрузке возрастает до значения тока верхней синусоиды, после чего ключи размыкаются и нагрузка подключается диодами D_3 и D_4 к источнику в противоположном направлении. Ток начинает спадать, и при достижении значения тока нижней синусоиды вновь включаются ключи T_1 и T_2 и т. д. Как видно, в инверторе происходит возврат реактивной энергии нагрузки в источник постоянного тока.

Координаты точек пересечения тока нагрузки с верхней синусоидой определяются из уравнений

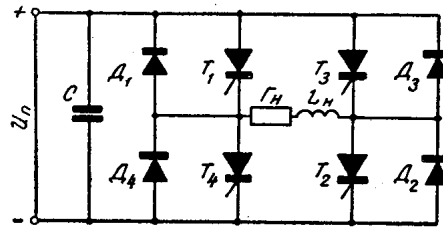


Рис. 2

Координаты точек встречи с нижней синусоидой определяются из уравнений

$$I_m \sin \omega t + \frac{\Delta I}{2} = i_3(t),$$

$$\frac{U}{R} + \left[-\frac{U}{R} + I_0(t) \right] e^{-\frac{R}{L}t} = i_H(t). \quad (1)$$

$$I_m \sin \omega (t + t_2) - \frac{\Delta I}{2} = i_1(t),$$

$$-\frac{U}{R} + \left[\frac{U}{R} + I_0(t) \right] e^{-\frac{R}{L}t} = i_H(t), \quad (2)$$

Для получения аналитической зависимости максимальной частоты, кроме общепринятых (сопротивление открытых вентилях равно нулю, закрытых — бесконечности, и внутреннее сопротивление источника питания в прямом и обратном направлении равно нулю) допущений, считается, что синусоида при малых углах, отсчитываемых от начала координат, заменяется касательной, а экспонента при малых аргументах определяется двумя первыми членами разложения ее в ряд Маклорена.

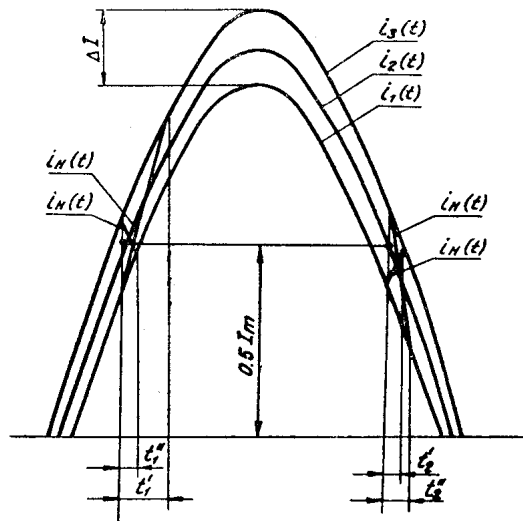


Рис. 3.

Кроме того, считается, что период частоты переключения остается постоянным в интервалах $0 \div \frac{\pi}{2} \left(\pi \div \frac{3}{2} \pi \right)$ и $\frac{\pi}{2} \div \pi \left(\frac{3}{2} \pi \div 2\pi \right)$

и равен соответственно T_{1cp} и T_{2cp} . Средний период частоты коммутации определяется в соответствующих интервалах на уровне $0,5 I_m$, так как наклоны всех аппроксимирующих прямых и, следовательно, период коммутации являются линейной функцией тока. Последнее допущение справедливо, когда $f_{кр} \gg f_{вых}$. Частота коммутации определяется выражением

$$f_{кр} = 2 \left(\frac{\pi}{2\omega T_{1cp}} + \frac{\pi}{2\omega T_{2cp}} \right) \frac{\omega}{2\pi} = \frac{T_{1cp} + T_{2cp}}{2T_{1cp}T_{2cp}}. \quad (3)$$

Период частоты коммутации как T_{1cp} , так и T_{2cp} состоит из времен нарастания и спада тока, которые могут быть определены следующим образом.

Для участка $0 \div \frac{\pi}{2}$ уравнения (1) с учетом принятых допущений

$$i_3(t) = 0,5I_m + \frac{\Delta I}{2} + 0,866I_m\omega t,$$

$$i_n(t) = \left(0,5I_m - \frac{\Delta I}{2} \right) + \left(\frac{U}{L} - 0,5I_m \frac{R}{L} + \frac{\Delta I}{2} \frac{R}{L} \right) t.$$

Из условия равенства $i_3(t) = i_n(t)$ время нарастания тока на участке $\left(0 \div \frac{\pi}{2} \right)$ (рис. 3).

$$t'_2 = \frac{\Delta I}{\frac{U}{L} - \frac{R}{2L} (I_m - \Delta I) - 0,866 I_m \omega}. \quad (4)$$

Аналогичным образом определяется время нарастания тока на участке $\left(\frac{\pi}{2} \div \pi \right)$:

$$t'_2 = \frac{\Delta I}{\frac{U}{L} - \frac{R}{2L} (I_m - \Delta I) + 0,866 I_m \omega}. \quad (5)$$

Время спадания тока определяется из уравнения (2) с учетом принятых допущений.

На участке $0 \div \frac{\pi}{2}$;

$$i_1(t) = 0,5I_m - \frac{\Delta I}{2} + 0,866I_m\omega t,$$

$$i_n(t) = \left(0,5I_m + \frac{\Delta I}{2} \right) - \left(\frac{U}{L} + 0,5I_m \frac{R}{L} + \frac{\Delta I}{2} \frac{R}{L} \right) t,$$

из условия равенства $i_1(t) = i_n(t)$

$$t''_1 = \frac{\Delta I}{\frac{U}{L} + (I_m + \Delta I) \frac{R}{2L} + 0,866 I_m \omega}. \quad (6)$$

Соответственно для участка $\left(\frac{\pi}{2} \div \pi \right)$

$$t''_2 = \frac{\Delta I}{\frac{U}{L} + \frac{R}{2L} (I_m + \Delta I) - 0,866 I_m \omega}. \quad (7)$$

Из выражений (3) ÷ (6), пренебрегая величинами второго порядка, определяется приближенное значение частоты коммутации

$$f_{\text{кр}} = \frac{R}{2L} \cdot \frac{4k_u^2 - 3\text{tg}^2\varphi - 1}{4k_i k_u}, \quad (8)$$

где

$k_u = \frac{U_n}{I_m R}$ — коэффициент использования напряжения источника питания;

$k_i = \frac{\Delta I}{I_m}$ — коэффициент погрешности воспроизведения формы тока;

$$\text{tg}\varphi = \frac{\omega L}{R}$$

Приближенное значение максимально возможной воспроизводимой частоты $f_{\text{max пр}}$ при заданной погрешности воспроизведения формы тока определится из условия равенства периода коммутации бесконечности на уровне $0,5 I_m$;

$$f_{\text{max пр}} = \frac{R}{2L\pi} \sqrt{\frac{4k_u^2 - 1}{3}}. \quad (9)$$

Так как выражение справедливо для случая $f_k \gg f_{\text{вых}}$, то для получения выражения, справедливого во всем диапазоне изменения выходной частоты, используется способ аппроксимации (8) путем подбора простейших функций [3], в результате чего уточненное значение частоты коммутации имеет вид:

$$f_{\text{кр}} = \frac{R}{L} \frac{1,43\text{tg}^2\varphi}{\sqrt{k_i k_u^2} 2\pi} \sqrt{\frac{4k_u^2 - 1}{3}} + \frac{R}{L} \frac{4k_u^2 - 3\text{tg}^2\varphi - 1}{8k_i k_u} \quad (10)$$

Уточненное значение максимально воспроизводимой частоты получается (10) при условии равенства частоты коммутации

$$t_{\text{max}} = \frac{-1 \pm \sqrt{1 + 4ab}}{2a}. \quad (11)$$

где

$$a = \frac{2\pi L}{R} \left(\frac{1,43}{k_u^2 \sqrt{k_i}} \sqrt{\frac{4k_u^2 - 1}{3}} - \frac{3\pi}{4k_i k_u} \right),$$

$$b = \frac{R}{2L} \frac{4k_u^2 - 1}{4k_u k_i}.$$

Максимальная частота коммутации на низких выходных частотах определяется из (10) при условии $\omega_{\text{вых}} = 0$.

$$f_{\text{к max}} = \frac{R}{2L} \frac{4k_u^2 - 1}{4k_u k_i}. \quad (12)$$

Реактивная мощность может компенсироваться также и закорачиванием нагрузки в определенные моменты времени.

На рис. 1 приведена зависимость изменения тока при данном способе компенсации с учетом того, что нарастание и спад тока происходит по закону

$$i_{\text{н}}^*(t) = \frac{U}{R} + \left(-\frac{U}{R} + I_0 \right) e^{-\frac{R}{L} t}, \quad (13)$$

$$i_{\text{н}}^*(t) = I_0 e^{-\frac{R}{L} t}.$$

Характерной особенностью такого режима является наличие точки $\Theta_{\text{гр}}$, с которой ток, изменяясь от своего начального значения до нуля, не пересекается с нижней синусоидой $i_1(t)$. В этом случае при достижении током величины $I = I_m \cos \omega t + \frac{\Delta I}{2} k + \frac{\Delta I}{2}$ (точка А) необходимо перевести инвертор в режим компенсации источником постоянного тока. Здесь $k=0,1+0,2$ — характеризует величину превышения тока нагрузки по сравнению с током верхней синусоиды (рис. 1).

Допущения, принятые ранее, справедливы в этом случае до $\Theta_{\text{гр}}$, и частота коммутации может быть определена, если найти среднее значение периода коммутации в интервале $0 \div \Theta_{\text{гр}}$

$$t_k = 2 \left(\frac{\Theta_{\text{зр}}}{\omega T_{\text{лср}}^*} \right) \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\Theta_{\text{гр}}}{\pi T_{\text{лср}}^*}. \quad (14)$$

где

$T_{\text{лср}} = t'_{1*} + t''_{1*}$ — среднее значение периода коммутации в интервале $0 \div \Theta_{\text{гр}}$;

t'_{1*}, t''_{1*} — соответственно времена нарастания и спада тока в интервале $(2 \div \Theta_{\text{гр}})$.

В интервале от $\Theta_{\text{гр}}$ до π частота коммутации считается равной нулю. Из равенства $i_{\text{н}}^*(t) = i_1(t)$ и (13) и учетом допущений определяется:

$$t''_{1*} = \frac{\Delta I}{0,866 I_m \omega + 0,5 I_m \frac{R}{L} + \frac{\Delta I}{2} \frac{R}{L}}.$$

С учетом (4), (13), (14) $t_{1*} = t'_{1*}$ определяется приближенное значение частоты коммутации:

$$f_{\text{ксп}}^* = \frac{R}{L} \frac{\Theta_{\text{гр}}}{\pi} \frac{2k_u(1,73 \operatorname{tg} \varphi + 1) - (1,73 \operatorname{tg} \varphi + 1)^2}{4k_i k_u}. \quad (15)$$

Приближенное значение максимально возможной воспроизводимой частоты определяется, как и в предыдущем случае,

$$f_{\text{max пр}}^* = \frac{R}{L} \frac{2k_u - 1}{1,73 \cdot 2\pi}. \quad (16)$$

В силу принятых допущений выражение (15) справедливо для частот $f_{\text{к}} \gg f_{\text{вых}}$. На основании графических построений и анализа (15) зависимость $f_{\text{ксп}}^*$ может быть аппроксимирована выражением $f_{\text{ксп}}^* = f_{\text{н}} + f_{\text{в}}$, где $f_{\text{н}}$ и $f_{\text{в}}$ характеризует поведение $f_{\text{к}}$ на низких и верхних частотах. Частота $f_{\text{н}}$ получена аналитически и совпадает с (15), а частота

$f_{\text{в}} = \frac{R}{L} \frac{2k_u - 1}{1,73 \cdot 2} \frac{\pi}{\Theta_{\text{гр}}} \frac{1}{k_u \sqrt{k_i}} \operatorname{tg} \varphi$ получается с использованием метода подбора простейших функций [—3]. Окончательное выражение для частоты коммутации имеет вид

$$f_{\text{к}}^* = \frac{R}{L} \frac{\Theta_{\text{гр}}}{\pi} \frac{2k_u(1,73 \operatorname{tg} \varphi + 1) - (1,73 \operatorname{tg} \varphi - 1)^2}{4k_i k_u} + \frac{R}{L} \frac{2k_u - 1}{1,73 \cdot 2\pi} \times \times \frac{1}{k_u \sqrt{k_i}} \frac{\pi}{\Theta_{\text{гр}}} \operatorname{tg} \varphi, \quad (17)$$

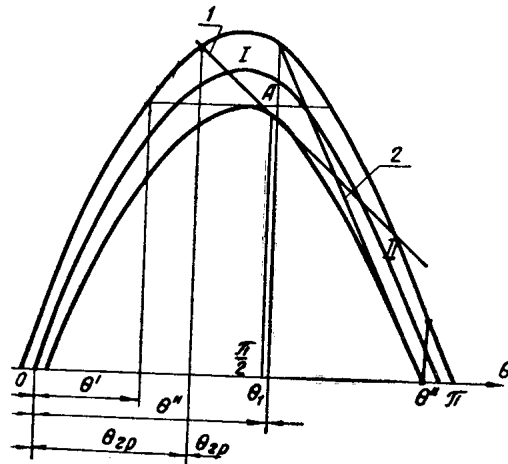


Рис. 4.

Значение $\Theta_{\text{гр}}$ может находиться в двух зонах (рис. 4):

I зона $\Theta' < \Theta_{\text{гр}} < \Theta''$,

II зона $\Theta'' < \Theta_{\text{гр}} < \Theta'''$.

Первая зона характеризуется тем, что прямая 1 (рис. 4), аппроксимирующая спадающий ток, является касательной к нижней синусоиде

$$i_1(t) = I_m \sin \Theta - \frac{\Delta I}{2}.$$

Как видно из рис. 4, $\Theta' = \arcsin(1 - k_i)$, а Θ'' находится из совместного решения уравнения касательной в точке $\pi - \frac{k_i}{2}$ к нижней синусоиде и уравнения верхней синусоиды при допущении, что

$$\sin \left(\pi - \frac{k_i}{2} \right) \approx \frac{k_i}{2} \text{ и } \cos \left(\pi - \frac{k_i}{2} \right) \approx -1.$$

$$\sin \Theta'' = -\Theta'' + \pi - \frac{k_i}{2}. \quad (18)$$

Графическое решение этого уравнения приведено на рис. 5. Величина $\Theta'_{\text{гр}}$ в первой зоне находится из решения двух уравнений. Первое уравнение получается из условия равенства наклонов аппроксимирующей прямой и касательной в точке Θ_1 , второе уравнение характеризует пересечение касательной и верхней синусоиды. Решение этих уравнений дает неявное выражение и его приближенное значение имеет вид:

$$\Theta'_{\text{гр}} = \Theta' + \text{ctg} \varphi. \quad)$$

Аналогично определяется $\Theta''_{\text{гр}}$ во второй зоне, что дает

$$\Theta'_{\text{гр}} = \pi - \frac{k_i}{2} - \text{tg} \varphi.$$

Из сравнения (16) и (19) видно, что при первом способе компенсации величина воспроизводимой частоты немного выше, чем при втором способе. Однако необходимо отметить, что на высоких выходных частотах необходимо переводить работу инвертора из второго режима в первый, т. е. по частотному диапазону инвертор одинаков как при компенсации источником постоянного тока, так и при комбинированной компенсации.

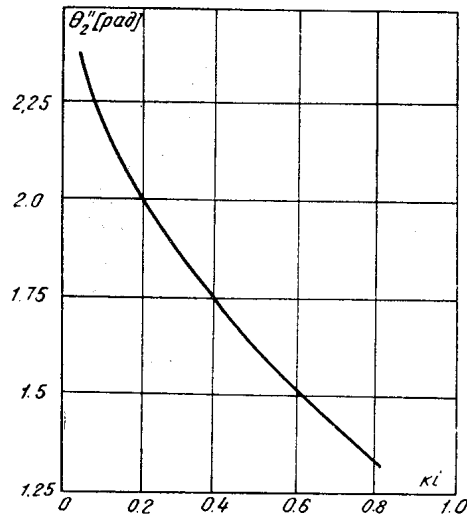


Рис. 5.

Максимальная частота коммутации на низких частотах

$$f_{к max}^* \cong \frac{R}{L} \frac{\theta_{гр}}{\pi} \frac{2k_u - 1}{4k_i k_u} \cong \frac{R}{L} \frac{2k_u + 1}{4k_i k_u}.$$

Сравнение этих частот

$$\frac{f_{к max}}{f_{к max}^*} = \frac{\frac{R}{2L} \frac{4k_u^2 - 1}{4k_i k_u}}{\frac{R}{L} \frac{2k_u - 1}{4k_u k_i}} = K_u - 0,5$$

показывает увеличение частоты коммутации на низких выходных частотах при первом способе компенсации.

Сравнение результатов, полученных из приведенных формул, с результатами точных графических построений и экспериментальными данными дает погрешность в определении частоты коммутации в пределах 3+10%.

Выводы

При формировании синусоидального тока частота переключения силовых вентилях при компенсации реактивной мощности нагрузки источником постоянного тока выше, чем при комбинированной компенсации. Первый способ рекомендуется при высоких выходных частотах, а второй при низких. При необходимости изменения частоты коммутации необходимо введение в цепь нагрузки дополнительных регулируемых дросселей, либо изменение напряжения источника питания.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Бродовский, Е. С. Иванов, Ю. П. Кузнецов. Статические преобразователи для частотно-токового управления машинами переменного тока. Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт, № 2, 1969.
2. И. Ф. Калинин, Б. П. Соустин. Инвертор с замкнутой системой формирования кривой тока. В сб.: «Устройства преобразовательной техники», вып. 2, «Наукова думка», Киев, 1969.
3. В. М. Ордынцев. Математическое списание объектов автоматизации. «Машиностроение», М., 1965.