

the drive system in the zone of overmodulation [9]. Basic control correlations of this method (1)–(4) and (6) include two special linear coefficients of overmodulation K_{ov1} and K_{ov2} , providing smooth pulses dropping process in this zone.

Conclusion. Method of synchronized space-vector modulation has been applied for control of symmetrical split-phase (six-phase) drive, allows synchronization of the motor phase voltage in both undermodulation and overmodulation control zones. Space-vector-based algorithms of synchronized PWM provide also minimum number of switchings and the minimum switching losses during the whole control range.

Continuous scheme of synchronized PWM provides better spectral composition of the phase voltage at low modulation indices. And in the zone of higher fundamental frequencies discontinuous versions of synchronized PWM provide lower weighted total harmonics distortion factor for the phase voltage. During the whole control range the spectra of the motor phase voltage of six-phase drives do not contain even harmonics and sub-harmonics, which is especially important for the high power/current systems.

Acknowledgment. This research has been supported in part by Marie Curie International Fellowships Award of the FP6 Program of the European Commission.

1. Bojoi R., Farina F., Profumo F. and Tenconi A. Dual-three phase induction machine drives control — a survey // CD-ROM Proc. of the IEEE Int'l Power Electr. Conf. — 2005. — 10 p.

2. Bojoi R., Tenconi A., Farina F. and Profumo F. Dual-source fed multiphase induction motor drive for fuel cell vehicles: topology

and control // Proc. of the IEEE Power Electr. Spec. Conf. — 2005. — Pp. 2676–2683.

3. Bojoi R., Tenconi A., Profumo F., Griva G. and Martinello D. Complete analysis and comparative study of digital modulation techniques for dual three-phase AC motor drives // Proc. of the IEEE Power Electr. Spec. Conf. — 2002. — Pp. 851–857.

4. Correa M.B.R., Jacobina C.B., da Silva C.R., Lima A.M.N. and da Silva E.R.C. Vector modulation for six-phase voltage source inverters // CD-ROM Proc. of the European Power Electr. Conf. — 2003. — 10 p.

5. Correa M.B.R., Jacobina C.B., da Silva C.R., Lima A.M.N. and da Silva E.R.C. Six-phase AC drive system with reduced common-mode voltage // Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Electr. Machines and Drives. — 2003. — Pp. 1852–1858.

6. Hadiouche D., Baghli L. and Rezzoug A. Space vector PWM techniques for dual three-phase AC machine: analysis, performance evaluation and DSP implementation // Proc. of the IEEE Ind. Appl. Soc. Conf. — 2003. — Pp. 648–655.

7. Mohan N., Undeland T.M. and Robbins W.P. Power Electronics. 3rd ed. — John Wiley & Sons. 2003. — 802 p.

8. Oleschuk V. and Blaabjerg F. Direct synchronized PWM techniques with linear control functions for adjustable speed drives // Proc. of the IEEE Appl. Power Electr. Conf. — 2002. — Pp. 76–82.

9. Oleschuk V., Bojoi R., Profumo F., Tenconi A. and Stankovic A.M. Multifunctional six-phase motor drives with algorithms of synchronized PWM // Proc. of the IEEE Ind. Electr. Soc. Conf. — 2006. — Pp. 1852–1859.

10. Von Jouanne A. and Zhang H. A dual-bridge inverter approach to eliminating common mode voltage and bearing and leakage currents // IEEE Trans. on Power Electr. — 1999. — 14. 1. — Pp. 43–48.

Надійшла 19.03.07

УДК 621.316.728.016.25

В.С.Федій, докт.техн.наук, С.Г.Наместник, канд.техн.наук (Ин-т електродинаміки НАН України, Київ)

Трёхфазный вентильно-реакторный источник реактивной мощности (ИРМ)

Исследовано влияние частоты и фазы импульсов управления в трёхфазном ИРМ на основе последовательного RLC-контура и вентильного коммутатора, циклически переключающего индуктивность этого контура на опережающую фазу питающей сети, на величину основной гармоник и несинусоидальность сетевого тока (при работе в индуктивном и емкостном режимах).

Досліджено вплив частоти і фази імпульсів керування в трифазному ДРП на основі послідовного RLC-контурі і вентильного коммутатора, що циклічно переключаче індуктивність цього контуру на випереджачу фазу мережі живлення, на величину основної гармоніки струму та несинусоїдальність струму мережі (при роботі в індуктивному та емнісному режимах).

В работе [1] были проанализированы регулировочные характеристики и качество кривой сетевого тока (для заданного диапазона регулирова-

ния) трёхфазного вентильно-реакторного ИРМ при циклическом переключении индуктивностей, входящих в силовую схему ИРМ [2], на отстающую

© Федій В.С., Наместник С.Г., 2007

фазу напряжения питающей сети (I способ управления).

Целью данной статьи является проведение аналогичных исследований, но при переключении индуктивностей на опережающую фазу (II способ управления) и сопоставление обоих способов переключения. При этом способе, в отличие от описанного в [1], частота основной гармоники на выходе коммутатора будет равна сумме частот сети $\omega_1 = 2\pi f_1$ и управления ключами $\Omega = 2\pi f_y$.

На основании уравнений, описывающих зависимость основной гармоники сетевого тока $I_{C(0)}^*$ от частоты управления (f_y) ключами коммутаторов в силовой схеме ИРМ [1], был построен ряд регулировочных характеристик $I_{C(0)}^* = \Psi(f_y)$ совместно с зависимостями коэффициентов гармоник $K_{\Gamma_i} = \gamma(f_y)$ сетевого тока ИРМ для различных относительных значений резонансной частоты $\nu = (\omega_1 \sqrt{LC})^{-1}$ последовательного RLC-контура, образующего (вместе с коммутатором в цепи индуктивности) силовую схему ветгильпо-реакторного ИРМ (рис. 1 в [2]). При этом возможны три наиболее характерных типа регулировочных характеристик.

I тип. Минимальное значение коэффициента гармоник K_{Γ_i} совпадает с разрывом регулировочной характеристики (вертикальная линия на рис. 1 при $f_y = 30,76$ Гц). Положительным значениям $I_{C(0)}^*$ соответствует режим потребления реактивной мощности из сети, отрицательным — режим генерирования в сеть. Изменяя частоту управления ключами коммутатора, можно плавно регулировать величину реактивной мощности на входе ИРМ, а также изменять ее знак (т.е. режим работы ИРМ).

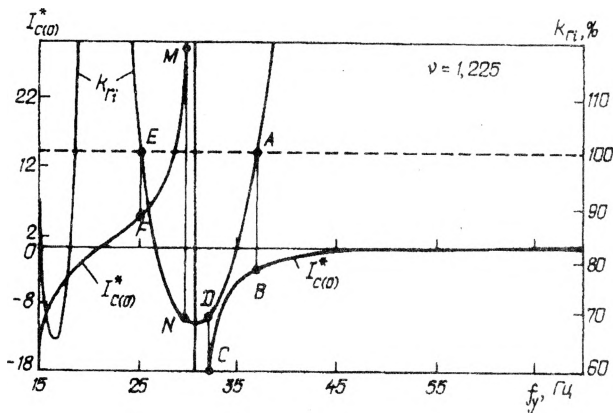


Рис. 1

Исходной при определении рабочих участков регулировочной характеристики примем точку F, которой соответствует значение коэффициента гармоник сетевого тока (точка E), равное 100%, а также минимальное значение тока основной гармоники. Увеличиваем частоту управления, пока

ток основной гармоники не возрастет в D_O раз (точка M) (диапазон регулирования реактивной мощности $D_O = Q_{\text{ном}}/Q_{\text{мин}}$ в нашем случае примем равным 6). Частота управления при этом возрастет в $D_f = 1,18$ раза, а коэффициент гармоник снизится до 69,3% (3–4 строки таблицы). При дальнейшем увеличении частоты управления происходит разрыв регулировочной характеристики и переход ИРМ в режим генерирования. Рабочая область при этом определяется по тем же параметрам ($D_O, K_{\Gamma_i} \leq 100\%$), что и для режима потребления. Исходными точками при ее построении будут точка A (в которой $K_{\Gamma_i} = 100\%$) и точка B ($Q_{\text{мин}}$). В отличие от режима потребления, для увеличения мощности ИРМ частоту управления необходимо снижать (а не увеличивать!). Точке C соответствует номинальное значение ($Q_{\text{ном}}$) генерируемой реактивной мощности, а точке D — значение коэффициента гармоник, соответствующее номинальному значению тока основной гармоники ($K_{\Gamma_i} = 70,17\%$, таблица).

Особенностью регулировочных характеристик (в обоих режимах работы ИРМ) является переход их через нулевое значение (так называемый "безреактивный" режим). В этих точках коэффициент гармоник равен бесконечности, так как $I_{C(0)}^* = 0$.

Анализ показывает, что только при одном значении параметра $\nu = 1,225$ можно обеспечить симметричность кривой $K_{\Gamma_i} = \gamma(f_y)$ относительно разрыва регулировочной характеристики, а значит возможность работы ИРМ в обоих режимах с заданными значениями D_O и $K_{\Gamma_i} \leq 100\%$.

II тип. Данный тип регулировочных характеристик (рис. 2) свойственен ИРМ, работающим только в индуктивном режиме. Для того, чтобы обеспечить заданный диапазон регулирования тока основной гармоники с коэффициентом гармоник $K_{\Gamma_i} \leq 100\%$, относительная резонансная частота контура должна быть равна $\nu = 1,198$ (рис. 2). Рабочий участок AC регулировочной характеристики находится левее линии разрыва.

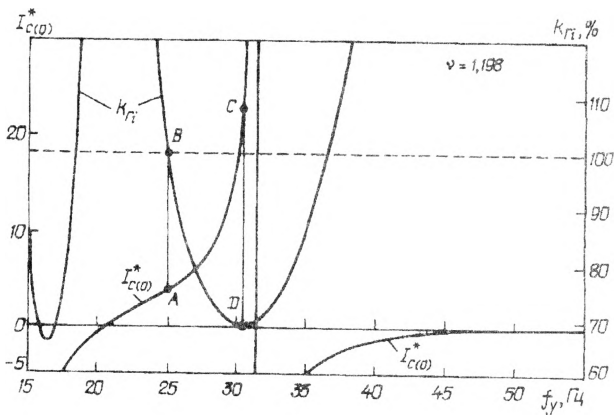


Рис. 2

III тип. Данный тип регулировочных характеристик (рис. 3) присущ ИРМ, работающим только в режиме генерирования. Рабочий участок ВС этой характеристики находится правее линии разрыва. Для того, чтобы обеспечить заданные параметры регулирования ($D_O=6$, $K_{ГТ} \leq 100\%$) резонансная частота контура должна равняться $\nu=1,2688$.

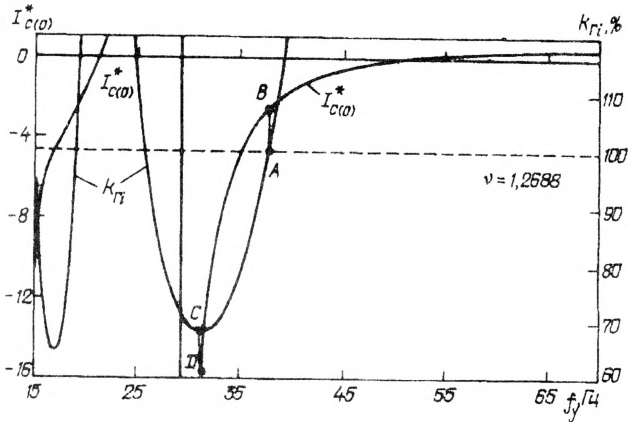


Рис. 3

Сопоставляя графики на рис. 1—3, видим, что для $D_O=6$ и $\nu < 1,225$ кривые $K_{ГТ} = \gamma(f_y)$ сдвигаются влево от линии разрыва, при $\nu > 1,225$ — вправо, при этом независимо от типа регулировочной характеристики коэффициент гармоник минимальный в режиме номинальной реактивной мощности ($Q_{ном}$).

Основным недостатком II способа управления является значительный уровень напряжения $u_{Смакс}$ на емкости, достигающий в номинальном режиме ($Q_{ном}$) значений 23,42 ... 43,77 U_m (таблица) (где U_m — амплитуда фазного напряжения сети), в то время как при способе управления [2] величина $u_{Смакс} \leq 1,52U_m$ и может быть еще больше снижена. Высокий уровень напряжений на емкости (а значит и на других элементах схемы ИРМ) не позволяет использовать хотя бы один из рассмотренных частных режимов (II или III типы регулировочных характеристик) для комбинации их с таковыми при I способе управления (как это имело место в вентильно-конденсаторных ИРМ [3]).

Уровни гармоник в кривой сетевого тока ИРМ

(при $Q=Q_{ном}$) примерно равны для обоих способов управления. Начальная фаза импульсов управления (независимо от способа управления) не влияет на величину комплексной амплитуды основной гармоники сетевого тока, а вызывает только поворот вектора $I_{C(0)}^*$ на угол Ψ_0 , определяющий начальную фазу напряжения сети в момент включения ИРМ.

Режим работы ИРМ	ν	Пределы изменения			
		$K_{ГТ}$	тока осн. гарм. (отн.ед.)	частоты f_y , Гц	$u_{Смакс}^*$ (отн.ед.)
потребл.(уч. АС, рис. 2)	1,198	100... ...68,77	3,88... ...23,44	25,00... ...30,41	5,20... ...35,79
		100... ...69,29	4,86... ...29,22	25,23... ...29,77	7,94... ...43,77
генерир.(уч. ВС, рис. 1)	1,225	100... ...70,17	3,0... ...18,00	37,08... ...32,22	5,45... ...27,67
		1,2688	100... ...68,15	2,63... ...15,81	37,82... ...31,32

Вывод. Вентильно-реакторный ИРМ с циклическим переключением индуктивностей на опережающую фазу напряжения сети характеризуется значительными перенапряжениями на силовых элементах его схемы и малопригоден для практического использования.

1. Федий В.С., Наместник С.Г. Исследование трехфазного вентильно-конденсаторного источника реактивной мощности (ИРМ) в индуктивном и емкостном режимах // Техн.электродинамика. — 2007. — № 5. — С. 24—27.

2. Федий В.С., Наместник С.Г. Регулировочные характеристики трехфазного вентильно-реакторного источника реактивной мощности (ИРМ) // Техн.электродинамика. — 2006. — № 4. — С. 22—27.

3. Федий В.С., Наместник С.Г. Обобщенные регулировочные характеристики трехфазного вентильно-конденсаторного источника реактивной мощности // Техн.электродинамика. Тем. вып. "Силовая электроника та енергоефективність". Ч. 2. — 2006. — С. 11—12.

Надійшла 28.02.2007