

DISTRIBUTION OF ELECTRIC AND THERMAL FIELDS IN HETEROGENEOUS DIELECTRIC AT PARTIAL DISCHARGE

I. M. Kucheryava

Institute of Electrodynamics of National Academy of Science of Ukraine

A partial discharge in gas inclusion of polyethylene insulation is simulated as transient process with varying in time electrical conductivity of the inclusion. The problems for computation of electrical and thermal fields are solved simultaneously. The availability of the thin surface layer in inclusion with passing current is simulated. By computer modeling it is revealed that at the origin of partial discharge, the electric field strength near the inclusion is increased 2–3 times and temperature in the inclusion at each discharge is raised by ~2–4°C during short time. Taking into account the cumulative effect of series of running partial discharges, such heating can be higher, and the heterogeneity in electric field distribution along with discharges can lead to insulation degradation on microlevel. References 5, figures 5/

Key words: polyethylene insulation, gas inclusion with surface layer, partial discharge, computer modeling.

1. Kuchinskii G.S. Partial discharge in high-voltage constructions. – Leningrad: Energiia, 1979. – 224 p.
2. Fedorenko G.M., Podoltsev A.D., Kucheryavaya I.N., Karpuchenko V.P., Gruboj O.P., Grimud G.I. Possibilities of creating in Ukraine of high-voltage electroenergy equipment on the basis of modern cable technology. // *Gidroenergetika Ukraini*. – 2007. – № 3. – p. 10–18.
3. Dissado L.A., Fothergill J.C. Electrical degradation and breakdown in polymers. – London: Peter Peregrinus Ltd. for IEE, 1992. – 601 p.
4. Illias H.A., Chen G., Lewin P.L. The influence of spherical cavity surface charge distribution on the sequence of partial discharge events. // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2011. – Vol. 44. – 15 p. – <http://iopscience.iop.org/0022-3727/44/24/245202/>
5. Seghir T., Nouar A., Lefkaier K., Mahi D. Study by simulation of the effect of temperature on the appearance of partial discharges in gaseous cavities contained in the insulator of high voltage cable. // *Proc. of IEEE Power Tech Conference*. – Bologna, Italy. – 23–26 June, 2003. – Vol. 2. – 4 p. – <http://www.labplan.ufsc.br/congressos/PowerTech/papers/169.pdf>

УДК 621.314:621.391

С. В. Рождественский, К. В. Гончаров
ООО «Южэлектропроект», г. Харьков, Украина

СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК НАПРЯЖЕНИЯ В РОТОРЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ, ПИТАЕМОГО ОТ МНОГОУРОВНЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ.

В статье предложена методика определения напряжений высших гармоник, наводимых в роторе неявнополюсного синхронного двигателя при питании от преобразователя частоты. Приводится экспериментальная зависимость коэффициента трансформации синхронного двигателя от частоты напряжения статора. Анализируются выходные напряжения преобразователя частоты с многоуровневой широтно-импульсивной модуляцией. Обосновывается схема подключения синусного фильтра и рассчитываются его параметры. Показано, что применение синусного фильтра позволяет значительно снизить напряжения высших гармоник в статоре и роторе синхронного двигателя.

Ключевые слова: синхронный двигатель, автономный инвертор напряжения, параметры эквивалентной схемы замещения, гармонический состав, высшие гармоники.

У статті запропоновано методику визначення напруг вищих гармонік, що наводяться в роторі неявнополюсного синхронного двигуна при живленні від перетворювача частоти. Подається експериментальна залежність коефіцієнта трансформації синхронного двигуна від частоти напруги статора. Аналізуються вихідні напруги перетворювача частоти з багаторівневою

широотно-імпульсивною модуляцією. Обґрунтовується схема підключення синусного фільтра і розраховуються його параметри. Показано, що застосування синусного фільтра дозволяє значно знизити напруги вищих гармонік в статорі та роторі синхронного двигуна.

Ключові слова: синхронний двигун, автономний інвертор напруги, параметри еквівалентної схеми заміщення, гармонічний склад, вищі гармоніки.

Введение

В настоящее время широкое распространение получили преобразователи частоты (ПЧ) на основе автономных инверторов напряжения (АИН). При питании асинхронных двигателей от ПЧ проблема совместимости практически не возникает [1]. Однако при питании синхронных двигателей (СД) от ПЧ необходимо учитывать несколько важных особенностей [2]. Высшие гармоники (ВГ), генерируемые ПЧ, трансформируются в обмотку возбуждения и могут вызывать нарушения работы СД и тиристорного возбудителя. Авторам не удалось найти в литературе методику точного определения напряжений ВГ, наводимых в роторе СД при питании от ПЧ. В данной работе делается попытка устранения этого пробела. Показано также, что применение синусного фильтра в многоуровневом ПЧ позволяет значительно снизить напряжения ВГ в статоре и роторе СД.

Основная часть

На рис. 1 схематично изображен разрез СД. Показаны статорные обмотки, А, В, С, которым соответствуют выходные напряжения ПЧ U_A, U_B, U_C и роторная обмотка с напряжением U_r . Ротор вращается по часовой стрелке с угловой скоростью ω . θ - угол, определяющий положение ротора.

Определим напряжения, наводимые в роторной обмотке возбуждения со статорных обмоток. Считаем, что СД явнополюсный, а также пренебрегаем падениями напряжений в реактивном сопротивлении рассеяния и в активном сопротивлении обмоток статора [3].

Тогда напряжение, трансформируемое из статорной обмотки фазы А в роторную обмотку равно:

$$U_{rA} = U_{sA} \cdot K \cdot \cos \theta, \quad (1)$$

где K – коэффициент трансформации СД;

U_{rA} – мгновенное значение напряжения, трансформированного в ротор со стороны статорной обмотки фазы А;

U_{sA} – мгновенное значение статорного напряжения фазы А;

θ – угол между осями роторной обмотки и статорной обмотки фазы А, $\theta = \omega \cdot t$,

где ω – синхронная скорость вращения ротора СД, $\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}$;

n – синхронная скорость, выраженная в оборотах в минуту.

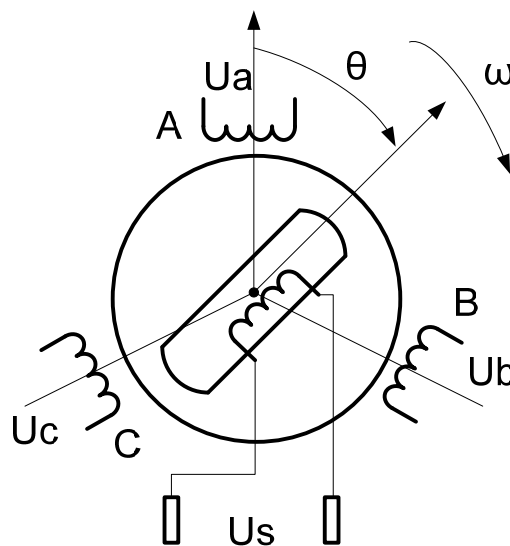


Рис. 1

Для фаз В и С уравнение (1) преобразуется к виду:

$$U_{rB} = U_{sB} \cdot K \cdot \cos\left(\theta - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right), \quad (2)$$

$$U_{rC} = U_{sC} \cdot K \cdot \cos\left(\theta - \frac{4 \cdot \pi}{3}\right). \quad (3)$$

Суммарное напряжение, наводимое в роторе:

$$U_r = U_{rA} + U_{rB} + U_{rC} = K \cdot [U_{sA} \cdot \cos\theta + U_{sB} \cdot \cos\left(\theta - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + U_{sC} \cdot \cos\left(\theta - \frac{4 \cdot \pi}{3}\right)]. \quad (4)$$

На рис. 2 представлена схема модели Simulink многоуровневого ПЧ на основе АИН. Каждая фаза ПЧ состоит из пяти последовательно соединенных модулей, схема одного модуля ПЧ приведена на рис. 3.

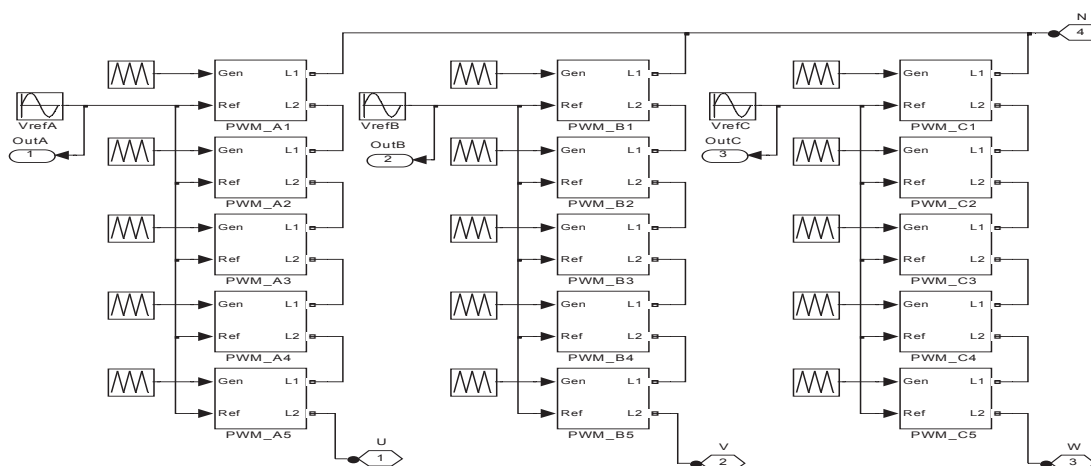


Рис. 2

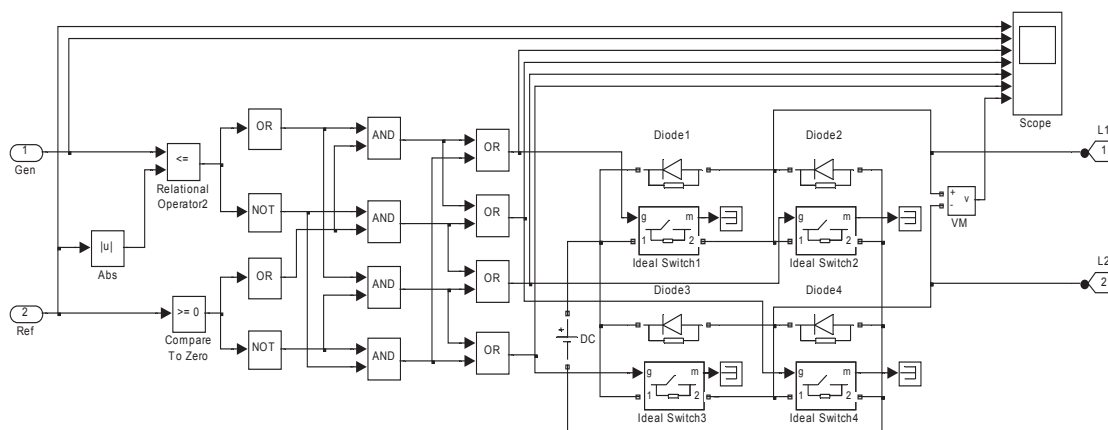


Рис. 3

На рис. 4 представлена общая схема модели, реализующая формулы (1-4) для определения напряжения, наводимого в роторе СД, питаемого от многоуровневого ПЧ. Выход ПЧ подключен к трехфазной активно-индуктивной нагрузке.

Величина тока нагрузки практически не влияет на форму выходных напряжений ПЧ. В модели рассчитывается средняя величина напряжения, наведенного в роторе, определяется разница между мгновенным и средним значениями напряжения ротора, т.е. переменное напряжение, наводимое в роторе, вычисляется действующее значение этого напряжения, а также осциллографируются следующие сигналы: 1 – задания выходных фазных напряжений; 2 – выходные фазные напряжения U, V, W; 3 – общее напряжение, в обмотке возбуждения; 4 – среднее значение напряжения ротора; 5 – действующее значение переменной составляющей напряжения ротора; 6 – коэффициент искажения синусоидальности выходного напряжения W.

Напряжения заданий выходных фазных напряжений ПЧ:

$$U_U = U_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2} + \delta\right), \tag{5}$$

$$U_V = U_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3} + \frac{\pi}{2} + \delta\right), \tag{6}$$

$$U_W = U_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{4 \cdot \pi}{3} + \frac{\pi}{2} + \delta\right), \tag{7}$$

где δ – угол нагрузки.

На холостом ходу векторы вращающихся магнитных потоков ротора и статора располагаются в одном направлении ($\delta = 0$). При работе СД в режиме двигателя ротор тормозится и ось его магнитного поля будет отставать от оси вращающегося магнитного поля на некоторый угол δ [3]. Этот угол, изменяющийся, очевидно, только с изменением механической нагрузки, и характеризующий нагрузку, называется углом нагрузки δ . Момент $t = 0$ ($\theta = 0$) соответствует максимальному напряжению $3/2 \cdot U_m$, наводимому в обмотке возбуждения при угле $\delta = 0$. Далее вращающемуся ротору соответствует угол $\theta = \omega \cdot t$. При этом, в обмотке возбуждения все время наводится максимальное напряжение $3/2 \cdot U_m$. Намагничивающее действие постоянного напряжения $3/2 \cdot U_m$ компенсируется потоком (ампервитками) обмотки возбуждения. В обмотке возбуждения наводится постоянное напряжение величиной $3/2 \cdot U_m = 7500$ В ($U_m = 5000$ В – амплитуда задания фазного напряжения) и высокочастотная составляющая $U_{вч}$, определяемая пульсациями выходных напряжений модулей ПЧ: U, V, W:

$$U_{вч} = U_r - 3/2 \cdot U_m. \tag{8}$$

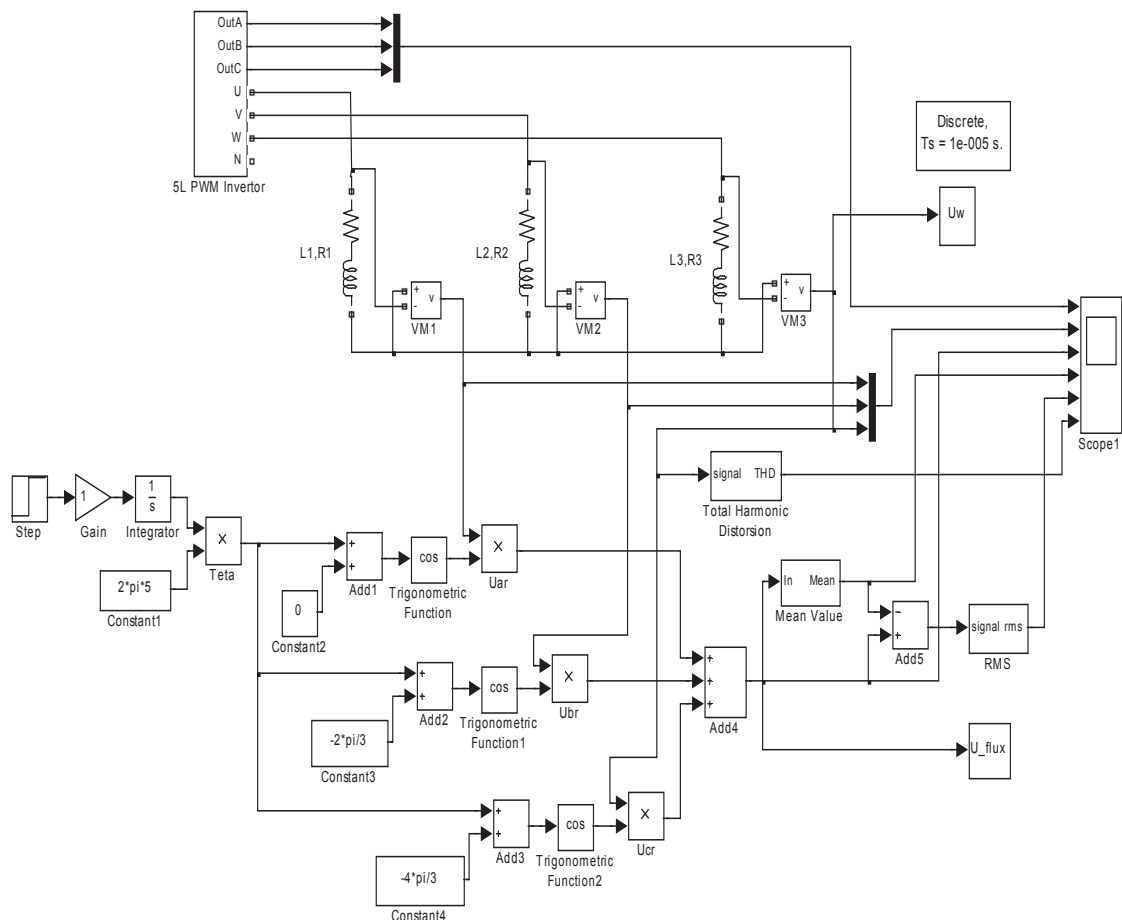


Рис. 4

Условие устойчивой работы СД [3]:

$$-\pi/2 \leq \delta \leq \pi/2 \quad (9)$$

По мере увеличения угла нагрузки δ , уменьшается постоянное напряжение, наводимое в обмотке возбуждения. Если $\delta = \pm\pi/2$, то наводимое в роторе постоянное напряжение равно нулю.

На рис. 5 показаны осциллограммы для выходной частоты ПЧ 50 Гц. На основании этих осциллограмм можно сказать следующее. Действующее значение переменной составляющей наводимого в роторе напряжения $U_{в.ч.50rms} = 607B$. При этом предполагается, что коэффициент трансформации между статором и ротором СД равен единице ($K = W_r/W_s = 1$). Коэффициент искажения синусоидальности (K_U или THD) напряжения фазы $THD = 9,83\%$.

На рис. 6 представлены результаты разложения в ряд Фурье напряжения, наводимого в роторе U_r , для выходной частоты ПЧ 50 Гц. Из графика видно, что в напряжении U_r содержится синусоидальное напряжение частотой 1000 Гц (соответствует частоте ШИМ многоуровневого инвертора), амплитудой $U_{m50(1000)} = 0,9 \cdot 747,6B = 672,84B$

$$(U_{rms50(1000)}) = \frac{672,84}{\sqrt{2}} = 475,77B - \text{действующее значение}.$$

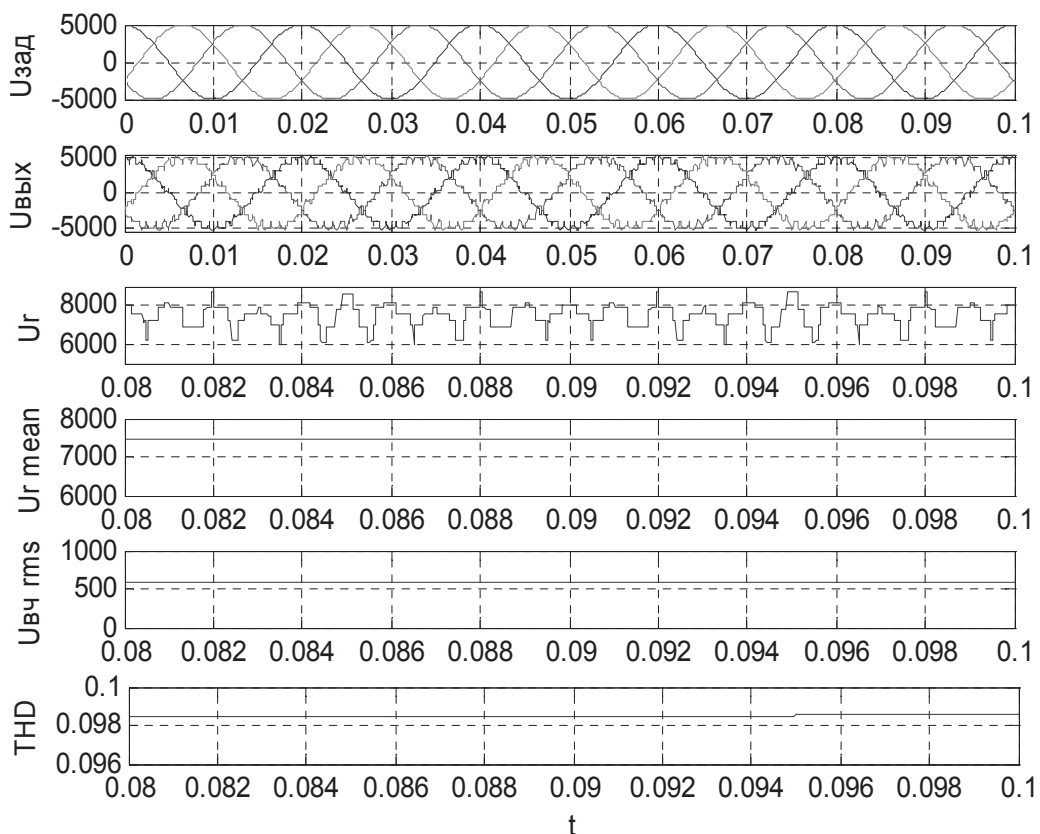


Рис. 5

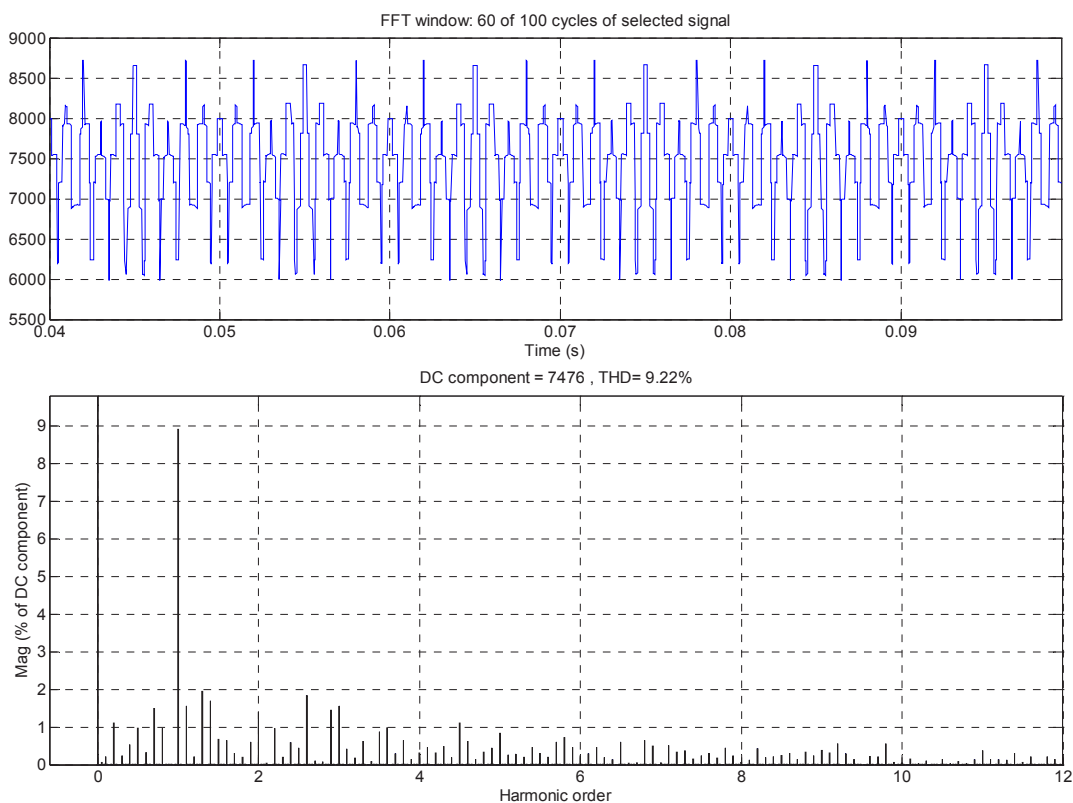


Рис. 6

На рис. 7 представлена зависимость коэффициента трансформации от частоты питающего напряжения $K(f_{\text{вых}}) = U_r / U_s$, полученная экспериментально для СД типа СДС-15-39-6; 1600 кВт; 6 кВ; 179 А; $\cos\varphi = 0,9$; кпд=95,7%; 1000 об./мин.; ротор 54 В; 265 А. При получении этой зависимости ось статорной обмотки А совмещалась с осью обмотки возбуждения. Статорные обмотки фаз В и С были разомкнуты. На обмотку фазы А от лабораторного генератора подавалось эталонное синусоидальное напряжение регулируемой частоты и амплитуды, а на обмотке возбуждения напряжение измерялось.

Низкое значение коэффициента трансформации K при $f_{\text{вых}} = 50 \text{ Гц}$ объясняется, в основном, влиянием демпферной обмотки СД. Следует отметить, что в СД без демпферной обмотки значение коэффициента трансформации на частоте $f_{\text{вых}} = 50 \text{ Гц}$ значительно выше и примерно равно отношению витков обмоток ротора и статора $K = W_r / W_s$. Кроме того, с ростом частоты $f_{\text{вых}}$ коэффициент трансформации СД дополнительно снижается. Это обусловлено увеличением падения напряжения на сверхпереходном реактивном сопротивлении X_d'' [3], влиянием паразитных емкостей, нелинейностью индуктивностей в схеме замещения СД и др.

Если умножить расчетное действующее значение напряжения 20-й гармоники (1000 Гц) на коэффициент трансформации, полученный опытным путем для этой же частоты, то можно получить реальное действующее значение напряжения частотой 1000 Гц, наводимого в обмотке возбуждения. По графику рис. 7, $f = 1000 \text{ Гц}$ $K_{50(1000)} = 0,8$. $U_{r50(1000)} = 0,8 \cdot 475,77 = 380,62 \text{ В}$. Таким образом, при частоте выходного напряжения ПЧ $f_{\text{вых}} = 50 \text{ Гц}$ в обмотке возбуждения СДС-15-39-6; 1600 кВт; 6 кВ наводится напряжение 380,62 В частотой 1000 Гц. Это напряжение значительно выше номинального напряжения обмотки возбуждения (54 В), и может привести не только к сбоям в работе тиристорного возбудителя, но и к выходу из строя его элементов.

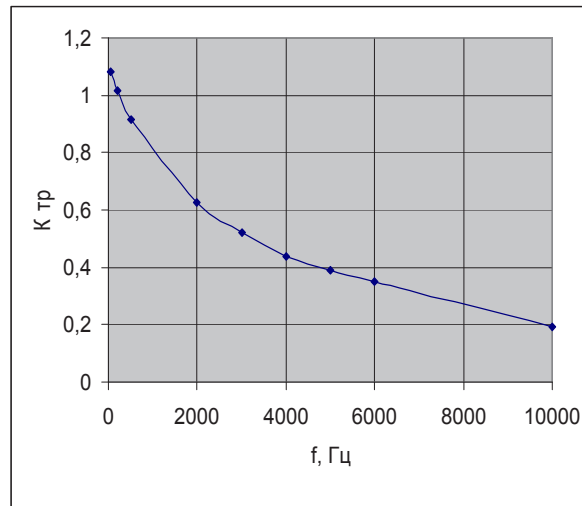


Рис. 7

Очевидно, для снижения напряжения, наводимого в роторе, необходимо уменьшить содержание высших гармоник в напряжениях статора.

Расчеты показывают, что угол δ незначительно влияет на величину высокочастотной составляющей напряжения $U_{вч}$. Поэтому, достигнуть снижения напряжений высших гармоник, наводимых в роторе, возможно при любых режимах работы электропривода. Кроме того, при одной и той же частоте ШИМ, расчетные значения коэффициента искажения THD и высокочастотной составляющей $U_{вч}$, полученные для различных алгоритмов ШИМ (Space Vector, Phase Shifted, Level Shifted) отличаются на несколько процентов. Поэтому рассматриваемый способ снижения напряжений высших гармоник, наводимых в роторе, применим для различных алгоритмов ШИМ.

В работе [4] предлагается управлять модулями ПЧ таким образом, чтобы все блоки формировали напряжения прямоугольной формы без ШИМ, кроме одного блока, дополняющего выходное интегральное напряжение с помощью ШИМ до синусоидальной формы. Кроме того, предлагается синусный фильтр (СФ) подключать только к выходу блока, осуществляющего ШИМ.

Этот алгоритм был опробован в Matlab. Однако анализ показал, что подключение СФ к модулю, осуществляющему ШИМ, не целесообразно, т.к. не позволяет формировать мгновенные перепады напряжения величиной $U_d = 1000В$.

Удовлетворительные результаты удалось получить только с моделью СФ, рассчитанного на полную мощность ПЧ $P_d = 1600кВт$ и подключенного к общему выходному напряжению [1]. После добавления СФ в модель рис. 4 были рассчитаны действующее значение переменной составляющей напряжения ротора $U_{вч}(f_{вых})$ и коэффициент искажения синусоидальности выходного напряжения $K_U(f_{вых})$ в функции выходной частоты ПЧ.

На рис. 8, 9 представлены графики зависимостей $U_{вч}(f_{вых})$, $K_U(f_{вых})$ многоуровневого ПЧ без синусного фильтра ($f_{ШИМ} = 1000Гц$) и с синусным фильтром ($f_{ШИМ} = 3000Гц$).

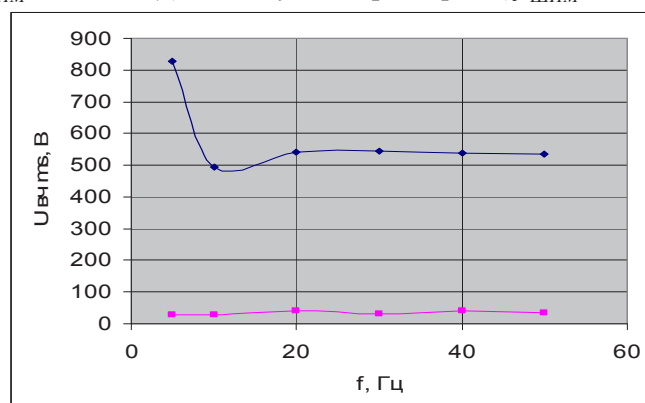


Рис. 8

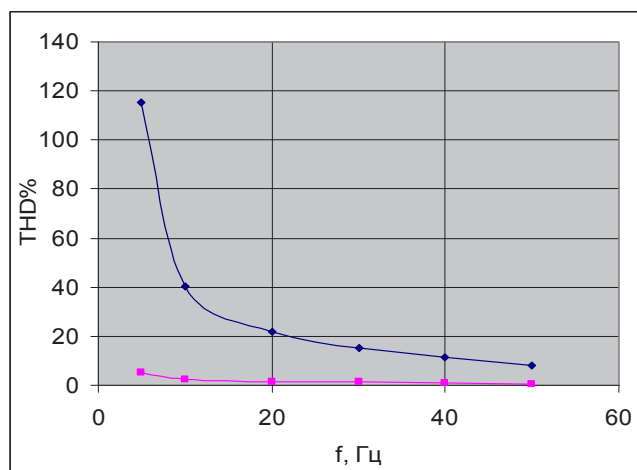


Рис. 9

Вывод

Анализ осциллограмм и рисунков позволяет сделать вывод, что применение СФ позволяет более, чем на порядок, снизить действующее значение напряжения, наводимого в роторе СД, и коэффициент искажения синусоидальности выходного напряжения. Это позволяет облегчить режим работы СД и системы его возбуждения, снизить вихревые токи в обмотках и железе, уменьшить вредное воздействие на изоляцию обмоток СД.

Список литературы

1. Рождественский С. В. Блоки внешнего подключения для преобразователей частоты // Техническая электродинамика. Тем. вип. Силовая электроника та енергоефективність. – 2009. – Ч.3 – С.7–9.
2. Рождественский С. В., Гончаров К. В. Особенности использования преобразователей частоты, питающих мощные синхронные двигатели. // Техническая электродинамика. Тем. вип. Силовая электроника та енергоефективність. – 2012. – Ч.4 – С.11–15.
3. Ковач К. П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1963. – 744 с.
4. Синчук О. Н., Михайличенко Д. А., Чернышев А. А., и др. Высоковольтный преобразователь частоты и способ управления им. // Техническая электродинамика. Тем. вип. Силовая электроника та енергоефективність. – 2012. – Ч.4 – С.123–127.

REDUCTION OF UPPER VOLTAGE HARMONIC LEVEL IN SYNCHRONOUS MOTOR ROTOR POWERED DUE TO MULTILEVEL FREQUENCY CONVERTOR

S.V. Rozhdestvenskij, K.V. Goncharov
«Yuzhelektroproject» LLC

The article proposes a method for determining upper voltage harmonics induced in the rotor of a [non-salient pole](#) synchronous motor, powered by a frequency converter. Experimental dependence of the transformation of a synchronous motor index on the frequency of stator voltage. Output voltage of the frequency converter with a multi-level impulse ratio modulation is analyzed. Connection pattern of a sine filter is explained and its parameters are calculated. It is shown that the use of a sine filter can significantly reduce upper harmonics voltage in stator and rotor of synchronous motors.

Key words: synchronous motor, self commutated voltage inverter, equivalent circuit parameters, harmonic content, upper harmonic.

1. Rozhdestvenskij S.V. [External Termination Blocks](#) for Frequency Converters // Technical Electrodynamics. Special issue. Power Electronics and Energy Efficiency. – 2009. – Pt.3 – P.7–9. (Rus)
2. Rozhdestvenskij S.V., Goncharov K.V. Usage Patterns for Frequency Converters Powering Vigorous Synchronous Motors // Technical Electrodynamics. Special issue. Power Electronics and Energy Efficiency. – 2012. – Pt.4 – P.11–15. (Rus)
3. Kovach K.P., Rats I. [Transient Phenomena](#) in [Alternating-Current Machines](#). – M.-L.: National Power Publishing House, 1963. – 744 p. (Rus)

4. *Sinchuk O.N., Mikhajlichenko D.A., Chernyshev A.A., and others. High-tension Frequency Converter and Its Operation Mode // Technical Electrodynamics. Special issue. Power Electronics and Energy Efficiency. – 2012. – Pt.4 – P.123–127. (Rus)*

УДК 621.314.

В. С. Бойко

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"

Кафедра ТЕ НТУУ "КПІ", м. Київ, Україна

М. І. Сотник

Сумський державний університет Кафедра ПГМ СумДУ, м. Суми, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПРОЦЕСУ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МОДЕЛІ ШЕСТИЛОПАТЕВОГО ВІДЦЕНТРОВОГО НАСОСА

Осуществлено сравнение результатов теоретических исследований электромагнитных процессов в разных режимах работы электрической модели шестилопастного центробежного насоса с результатами моделирования тех же режимов в пакете схемотехнического моделирования электрических и электронных схем и в пакете программного обеспечения для моделирования гидравлических процессов. Сделан вывод относительно адекватности электрического способа моделирования рабочих процессов центробежных насосов. Бібл. 2, табл. 1, рис. 3.

Ключевые слова: насос, модель, выпрямленное напряжение, напор, адекватность.

Здійснено порівняння результатів теоретичних досліджень електромагнітних процесів у різних режимах роботи електричній моделі шестилопатевого відцентрового насоса з результатами моделювання тих же режимів у пакеті схемотехнічного моделювання електричних і електронних схем та у пакеті програмного забезпечення для моделювання гідравлічних процесів. Зроблено висновок щодо адекватності електричного способу моделювання робочих процесів відцентрових насосів. Бібл. 2, табл. 1, рис. 3.

Ключові слова: насос, модель, випрямлена напруга, напір, адекватність.

Вступ

Використання для аналізу робочого процесу відцентрового насоса його електричної моделі доповнює традиційні методи досліджень і дозволяє застосовувати принципи гідроелектричної аналогії при дослідженні проблеми узгодженості характеристики насосного агрегату з характеристиками гідравлічної мережі та технологічного споживача.

Вплив результатів зазначених досліджень на обґрунтування доцільності проведення модернізації та формування вартості життєвого циклу насосного обладнання підтверджує актуальність теми досліджень.

Мета роботи. Довести адекватність гідравлічних процесів у відцентровому насосі та електромагнітних процесів у його електричній моделі через аналіз електромагнітних процесів в останній. Підтвердити отриманий результат стосовно насосного агрегату Д 2000-100.

Зміст роботи

На рис. 1 наведена схема електричної моделі відцентрового насоса Д 2000-100, який є пристроєм з однозавитковим спіральним відводом, робоче колесо якого має шість лопатей.

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= E_m \sin(\vartheta + \pi / 3); \\ e_2 &= E_m \sin \vartheta; \\ e_3 &= E_m \sin(\vartheta - \pi / 3); \\ e_4 &= E_m \sin(\vartheta - 2\pi / 3); \\ e_5 &= E_m \sin(\vartheta - \pi); \\ e_6 &= E_m \sin(\vartheta - 4\pi / 3). \end{aligned} \right\}$$