

АНАЛІЗ РОБОТИ ПЕРЕТВОРЮЧА ЧАСТОТИ НА НЕСИМЕТРИЧНЕ НАВАНТАЖЕННЯ З'ЄДНАНЕ ЗІРКОЮ

Победаш К.К., к.т.н., доц., Трубіцин К.В., ст. викл., Белаус І., студент
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Вступ. При роботі трифазних перетворювачів частоти з однополосною модуляцією (ПЧ) на несиметричне навантаження, при підключенні силових модуляторів (СМ) до фазних напруг мережі обмеженої потужності (мережа автономного об'єкту), протікає струм у нульовому проводі. Це викликає спотворення форми фазних напруг мережі, які пов'язані несинусоїдальним, часто переривчастим характером струму та наявністю реактивної потужності, яка за рахунок нульової послідовності струмів споживання нерівномірно розподіляється між фазами мережі живлення.

Мета роботи. Аналіз особливостей симетрування режимів роботи перетворювачів частоти відносно мережі живлення, та визначення алгоритмів керування режимами їх роботи з власним симетричним чи несиметричним навантаженням в широкому діапазоні регулювання вихідних напруг.

Матеріали і результати досліджень. Модель формування вихідної напруги ПЧ з трифазною вихідною напругою зображена на рис. 1, та має блоки силових модуляторів (БСМ) – БСМ₁ ... БСМ₃, кожен з яких є перетворювачем трифазної напруги в однофазну.

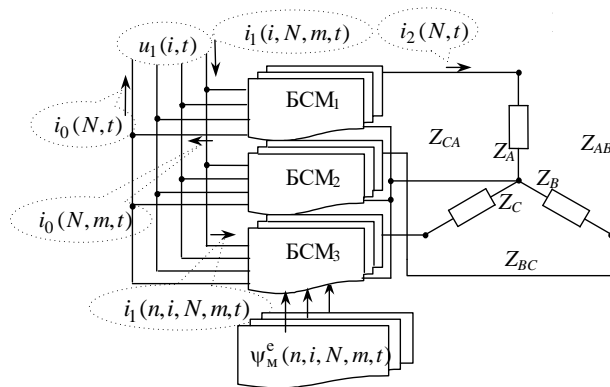


Рисунок 1 – Структурна схема ПЧ

За методом модулюючих функцій [1] процес формування миттєвих значень лінійних напруг описується виразом:

$$u_2(N, m, t) = \sum_{i=1}^3 \frac{u_1(i, t) \cdot \psi_m^e(i, N, m, t)}{k_{\text{тр}}}, \quad (1)$$

де $N = 1, 2, 3, \dots$ – число інверторів напруги у складі силових модуляторів (СМ), що входять до складу m -го БСМ; $m = 1, 2, 3$ – номер фази вихідної напруги, який співпадає з номером силового каналу формування вихідної напруги ПЧ, а також з номером відповідного БСМ; $u_1(i, t)$ – миттєві значення фазних напруг мережі живлення $i = 1, 2, 3$ – номер фази напруги живлення, який співпадає з

номером відповідного СМ, $\psi_m^c(i, N, m, t)$ – еквівалентний модулюючий вплив i -го СМ.

У випадку регулювання вихідної напруги ПЧ за рахунок одночасного широтно-імпульсного регулювання (ШІР) вихідної напруги кожного з n інверторів для визначення модулюючих функцій (МФ), що описують множини еквівалентних модулюючих впливів відповідних СМ, введемо найпростіші МФ $\psi_{s1,2}(k, n, i, N, m, t)$ та $\psi_{s3,4}(h, n, i, N, m, t)$, які визначають положення множини імпульсів керування силових ключів k та h відповідних стійок мостових інверторів. Тоді з урахуванням номера БСМ та величини кута зсуву $(n-1)\pi / BN$ в роботі окремих інверторів СМ, а також початкової фази α_0 кожного з імпульсів керування та кута керування $\alpha(t) = \alpha_0..90^\circ$, отримуємо вирази:

$$\psi_{s1,2}(k, n, i, N, m, t) = \text{sign} \left\{ \sin \left[\begin{array}{l} \omega_2 t + \alpha_0 + \alpha(t) + \frac{(n-1)\pi}{BN} - \\ - \frac{2\pi(i+m-2)}{3} - (k-1)\pi \end{array} \right] \right\}; \quad (2)$$

$$\psi_{s3,4}(h, n, i, N, m, t) = \text{sign} \left\{ \sin \left[\begin{array}{l} \omega_2 t - \alpha_0 - \alpha(t) + \frac{(n-1)\pi}{BN} - \\ - \frac{2\pi(i+m-2)}{3} - h\pi \end{array} \right] \right\}, \quad (3)$$

де ω_2 – частота слідування імпульсів керування силовими ключами інверторів, B – число, яке визначає величину кута зсуву в роботі окремих інверторів СМ.

МФ, що описує множину еквівалентних модулюючих впливів, запишемо як

$$\psi_m^c(i, N, m, t) = \sum_{n=1}^N \psi_m^c(n, i, N, m, t), \quad (4)$$

де $\psi_m^c(n, i, N, m, t)$ – МФ, яка описує множину еквівалентних модулюючих впливів n -х інверторів i -х СМ, що входять до складу m -х БСМ, з урахуванням (2) і (3) представимо як

$$\psi_m^c(n, i, N, m, t) = \frac{\psi_{s1,2}(k, n, i, N, m, t) + \psi_{s3,4}(h, n, i, N, m, t)}{2}. \quad (5)$$

У (2), (3) та (5) обов'язковими є умови за номерами ключів, які знаходяться в різних діагоналях мостових інверторів: якщо $k = 1$, то $h = 4$, інакше, якщо $k = 2$, то $h = 3$.

На рис. 2 наведені діаграми процесу формування симетричної системи трифазних квазісіносоїдальних напруг (КСН) на виході ПЧ за умов $\alpha_0 = 15^\circ$, $\alpha(t) = 0$ та $N = 4$.

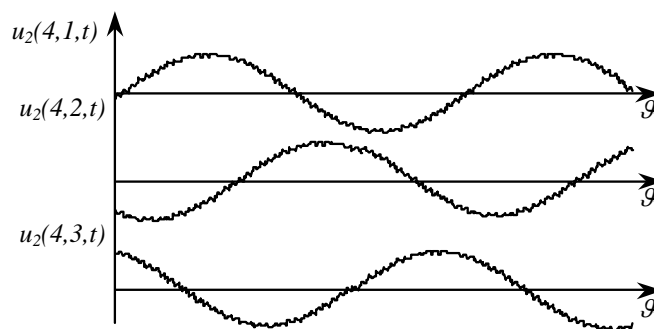


Рисунок 2 – Діаграми квазісіносоїдальних напруг на виході ПЧ

Маючи співвідношення (1) ... (5), нескладно записати математичні моделі вихідних напруг $u_2(i, N, m, t)$ окремих СМ, які приймають участь у формуванні m -х фаз вихідної напруги ПЧ, а також вихідних напруг $u_2(n, i, N, m, t)$ n -х інверторів, що входять до складу відповідних СМ, і навіть спаду напруг на кожному із усієї множини k -х $u_{s1,2}(k, n, i, N, m, t)$ та h -х $u_{s3,4}(h, n, i, N, m, t)$ силових ключів мостових інверторів. Такі моделі описуються виразами

$$u_2(i, N, m, t) = \frac{u_1(i, t) \cdot \psi_m^c(i, N, m, t)}{k_{\text{тр}}}; \quad u_2(n, i, N, m, t) = \frac{u_1(i, t) \cdot \psi_m^c(i, n, N, m, t)}{k_{\text{тр}}}; \quad (6)$$

$$u_{s1,2}(k, n, i, N, m, t) = \frac{u_1(i, t) \cdot (\psi_m^c(k, n, i, N, m, t) + 1)}{2}; \quad u_{s3,4}(h, n, i, N, m, t) = \frac{u_1(i, t) \cdot (\psi_m^c(h, n, i, N, m, t) + 1)}{2}.$$

Вхідні струми $i_1(n, i, N, m, t)$, які споживаються кожним з інверторів від відповідної фази мережі живлення, знайдемо із співвідношення

$$i_1(n, i, N, m, t) = \frac{u_2(N, m, t) \cdot \psi_m^c(n, i, N, m, t)}{R_n \cdot k_{\text{тр}}}, \quad (7)$$

а струми $i_1(i, N, m, t)$, які споживає m -й БСМ як $i_1(i, N, m, t) = \sum_{n=1}^N i_1(n, i, N, m, t)$;

струм у нульовому проводі m -го БСМ – відповідно

$$i_0(N, m, t) = \sum_{i=1}^3 i_1(i, N, m, t). \quad (8)$$

Підсумовуючи у загальному вузлі нульового проводу мережі за параметром m , отримаємо загальний струм у нульовому проводі перетворювача

$$i_0(N, t) = \sum_{m=1}^3 i_0(N, m, t) = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^3 \sum_{m=1}^3 i_1(n, i, N, m, t). \quad (9)$$

Якщо при підсумовуванні МФ (5) за параметрами n , i та m , отримаємо –

$$\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^3 \sum_{m=1}^3 \psi_m^c(n, i, N, m, t) = 0, \quad \text{і співвідношення (9) набуває виду } i_0(N, t) = 0 \quad \text{за}$$

рахунок симетрії складових трифазної системи струмів $i_0(N, m, t)$.

Якщо навантаження ПЧ з'єднане зіркою, то миттєві значення струмів трифазного несиметричного навантаження, запишемо як [3]

$$i_A(t) = \frac{u_2(N, 1, t)}{Z_A}, \quad i_B(t) = \frac{u_2(N, 2, t)}{Z_B}, \quad i_C(t) = \frac{u_2(N, 3, t)}{Z_C}.$$

За умови несиметричного навантаження $Z_A=Z_C>Z_B$, миттєве значення струму у фазі В має вигляд $i_B(t) = \frac{u_2(N, 3, t)}{Z_B} + \Delta i_B$.

Незважаючи на виконання умови (9), струм $i_0(N, t) = 0$ у загальному нульовому проводі ПЧ буде відрізнитись від нульових значень за рахунок порушень симетрії складових трифазної системи струмів $i_0(N, m, t)$.

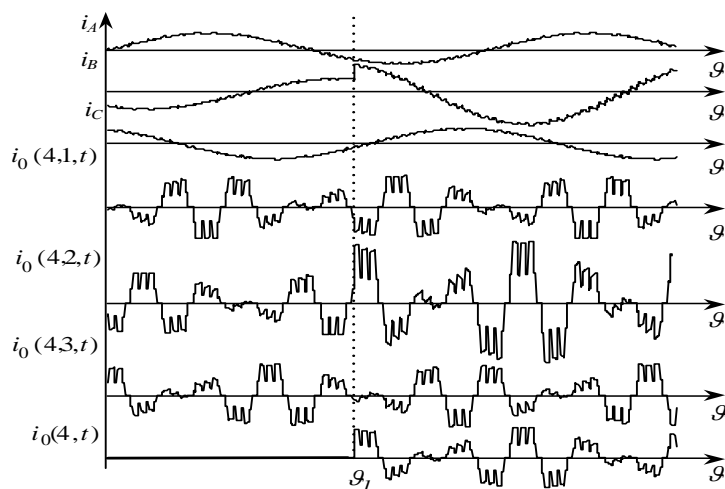


Рисунок 3 – Діаграми миттєвих значень струмів окремих фаз трифазного несиметричного навантаження, з'єднаного зіркою

За умов $\alpha_0 = 15^\circ$, $\alpha(t) = 0$ та $N = 4$, на інтервалі від 0 до t_1 навантаження трифазного ПЧ з КМ є симетричним, то струм у загальному нульовому проводі має нульове значення. Якщо в момент t_1 зробити накид струму другої фази В на величину Δi_B , то струм у загальному нульовому проводі ПЧ

$$i_0(N, t) = i_0(N, m, t) + \Delta i_0(N, m, t) = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^3 \frac{\Delta i_n(N, m, t) \psi_m^3(n, i, N, m, t)}{k_{тр}}$$

де $\Delta i_0(N, m, t)$ – несиметрична складова струму загального нульового проводу, що відповідає накиду струму навантаження у вихідній фазі ПЧ.

Висновки: У разі несиметричного трифазного навантаження для забезпечення відсутності струму в нульовому проводі потрібно виконання двох умов: необхідної, коли величина алгебраїчної суми трифазних складових багатofазних модулюючих впливів дорівнює нулю, і достатньої, за якої струми у нульових проводах окремих блоків СМ створюють симетричні трифазні системи або дорівнюють нулю.

Перелік посилань

1. Макаренко М.П., Сенько В.І., Юрченко М.М. Моделирование мережных перетворювачів модуляційного типу. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2002. - 140 с.
2. Макаренко М.П., Сенько В.І., Трубіцин К.В., Пілінський В.В. Особливості симетрування режимів роботи перетворювачів частоти відносно мережі живлення // Технічна електродинаміка, тематичний випуск “Силова електроніка та енергоефективність” :Київ-2005.- Ч.3, С.47-50.