ОДИН ІЗ СПОСОБІВ ПОЛІПШЕННЯ ГАРМОНІЧНОГО СКЛАДУ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ ИНВЕРТОРА

Мороз Д., студент, Зіменков Д.К., ст. викл., Трубіцин К.В., ст. викл.
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Вступ. Використання електричної енергії в різних областях техніки пов'язано з оптимальними умовами її генерації, передачі та розподілу. Для найбільш ефективного використання електричної енергії різні споживачі вимагають споживання її з нестандартними параметрами:, регульованими частотою та напругою, іншим числом фаз ніж у джерел енергії.

Мета роботи: визначити параметри електричного фільтра для компенсації
індуктивного струму навантаження инвертора напруги при живленні синхронного або асинхронного двигуна.

Матеріали і результати досліджень. Найпростішим способом поліпшення гармонічного складу вихідної напруги є застосування електричних фільтрів (рис.1). Паралельний елемент фільтра звичайно збільшує загальний струм навантаження інвертора. Послідовний елемент збільшує втрати вихідної напруги від струму навантаження, що протікає через нього. Основним недоліком простих LC – фільтрів (рис.1а) є спад напруги на дроселі та підвищене навантаження інвертора за рахунок струму конденсатора. Резонансні контури у послідовному та паралельному елементах дозволяють частково компенсувати вказані недоліки. Наприклад, послідовний контур L_1C_1 (рис.1б), настроєний у резонанс на основну гармоніку, зводить до мінімуму спад напруги від струму основної гармоніки. Паралельний резонансний контур (рис.1в), що представляє великий опір для струму основної гармоніки та малий для високих, править для зменшення додаткового навантаження на основній гармоніці.

Дослідження фільтрів показує, що найкращими фільтрувальними властивостями володіє фільтр (рис.1г), який передає в навантаження 1-у гармоніку практично без послаблення і максимально послаблює вищі гармоніки. Обидві ланки фільтра настроюються на 1-у гармоніку вихідної напруги.

Загальним недоліком розглянутих фільтрів є велика установлена потужність фільтра, отже, і габарити та маса, які зростають при зменшенні коефіцієнта гармонік $К_г$.

Наявність фільтра позначається на формі вихідної напруги, яка залежить від величини та характеру навантаження. В інверторах з регульованою частотою вихідної напруги необхідно перестроювати фільтри зі зміною частоти.

Крім того, у колі інвертор - навантаження можуть виникати складні феррорезонансні або автоколивальні процеси. При живленні від інвертора синхронного або асинхронного двигуна може виникнути явище конденсаторного самозбудження, яке проявляється у вигляді стійких автоколивань.

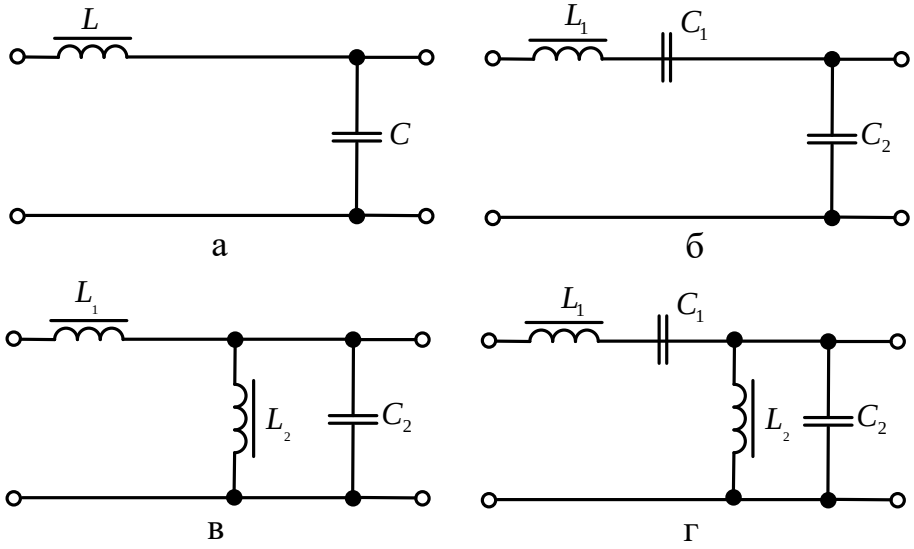

Рисунок 1– Схеми електричних фільтрів

Аналіз процесів у фільтрі (рис.1,г) проведемо, нехтуючи активними втратами в елементах фільтра та вважаючи характеристики елементів лінійними для режиму холостого ходу фільтра, тому що при підмиканні навантаження вищі гармоніки фільтруються найбільш ефективно.

Коефіцієнт передавання фільтра для будь-якої гармоніки може бути представлений у вигляді

$$\mathrm{K}_{u(q)} = \left|\frac{\dot{U}_{\text{вих}}}{\dot{U}_{\text{вх}}}\right| = \left|\frac{1}{\underline{z}_1 \underline{y}_2 + 1}\right| = \frac{1}{1 - \varepsilon\Delta^2} \qquad (1)$$

де $\underline{z}_1 = j\omega L_1 + 1/(j\omega C_1) = j\rho_1\Delta$ — опір послідовного контуру;

$\underline{y}_2 = 1/(\omega L_2) + j\omega C_2 = j\Delta/\rho_2$ — провідність паралельного контуру;

$\rho_1 = \omega L_1 = 1/(\omega C_1) = \sqrt{L_1/C_1} = Q_1 r_{\text{н}}/P_{\text{н}}$ — хвильовий опір послідовного контуру;

$\rho_2 = \omega L_2 = 1/(\omega C_2) = \sqrt{L_2/C_2} = P_{\text{н}} r_{\text{н}}/Q_2$ — хвильовий опір паралельного контуру;

$Q_1 = Q_{L_1} = Q_{C_1} = I_{\text{н}}^2\rho_1$ — установлені потужності елементів послідовного контуру;

$Q_2 = Q_{L_2} = Q_{C_2} = = U_{\text{н}}^2/\rho_2$ — установлені потужності паралельного контуру;

$P_{\text{н}} = I_{\text{н}}^2 r_{\text{н}} = U_{\text{н}}^2 / r_{\text{н}}$ — потужність навантаження (навантаження чисто активне);

$$\Delta = \left(\omega_{(q)}/\omega_{(1)}\right) - \left(\omega_{(1)}/\omega_{(q)}\right) = \left(q\omega_{(1)}\right)\Big/\omega_{(1)} - \omega_{(1)}\Big/\left(q\omega_{(1)}\right) =$$

$= \left(q^2 - 1\right)\Big/q$ — відносний розлад контуру; $\varepsilon = \rho_1/\rho_2 = Q_1 Q_2 / P_{\text{н}}^2$.

З виразу (1) видно, що для будь-яких значень ε коефіцієнт передавання за 1-ю гармонікою дорівнює одиниці, і для $\varepsilon < 1$ можливо зростання коефіцієнта передавання для деяких гармонік. У фільтрі при деяких значеннях ε можливий послідовний резонанс для вищих гармонік, які є у вихідній напрузі інвертора. Це призводить до перенавантаження вентилів інвертора струмами вищих гармонік. Величину ε, при якій виникає послідовний резонанс на визначеній гармоніці, можна визначити, якщо прирівняти знаменник до нуля,

$$\varepsilon_{\text{рез}} > q^2 \Big/ \left(q^2 - 1\right)^2 .$$

При розрахунку фільтра треба, щоб прийняте значення ε було би більшим за $\varepsilon_{\text{рез}}$, при якому настає послідовний резонанс на самій низькій з вищих гармонік вихідної напруги інвертора, тобто

$$\varepsilon > q_{\text{н}}^2 \Big/ \left(q_{\text{н}}^2 - 1\right)^2 .$$

Для практичних цілей являє інтерес зв'язок між величиною ε і потрібним коефіцієнтом гармонік для однофазного інвертора

$$\text{К}_{\text{г}} = \frac{\sqrt{\sum_{q=2}^{\infty} \left[\text{К}_{(q)} U_{(q)}\right]^2}}{\text{К}_{(1)} U_{(1)}} = \sqrt{\sum_{q=2}^{\infty} \left(\frac{\sin^2 \frac{q\pi}{2}}{q}\right)^2 \cdot \left[\frac{1}{1 - \varepsilon\Delta^2}\right]} .$$

Визначимо, при якому розподілі установлених потужностей всередині незмінної сумарної потужності фільтра $Q_{\text{сум}} = Q_1 + Q_2$ має місце максимум ε. Вираз для ε може бути представлений у вигляді

$$\varepsilon = \frac{Q_1 (Q_{\text{сум}} - Q_1)}{P_{\text{н}}^2} .$$

Максимальне значення ε знаходимо з умови $\frac{d|\varepsilon(Q)|}{dQ}=0$, тобто $Q_{\text{сум}}-2Q_1=0$ і $Q_1=Q_{\text{сум}}/2$.

Таким чином, максимальне послаблення будь-якої з вищих гармонік, або мінімум коефіцієнта гармонік при заданій установленій потужності фільтра одержуємо, коли потужності обох контурів фільтра рівні, тобто $Q_1=Q_2=\sqrt{\varepsilon}P_{\text{н}}$. При цьому $\rho_1=\sqrt{\varepsilon}r_{\text{н}}$; $\rho_2=r_{\text{н}}/\sqrt{\varepsilon}$; $L_1=\rho_1/\omega_1$; $C_1=1\Big/\left(\omega_{(1)}\rho_1\right)$; $L_2=\rho_2/\omega_{(1)}$; $C_2=1\Big/\left(\omega_{(1)}\rho_2\right)$.

Висновки. Підмикання на вихід фільтра активно-індуктивного навантаження може призвести до збільшення коефіцієнта гармонік вихідної напруги. Щоб запобігти цього, треба повністю компенсувати індуктивну складову струму навантаження. Якщо реактивна потужність навантаження більша за потрібну для фільтрації потужність, то здійснюється повна компенсація індуктивного струму навантаження конденсатором C_2, а установлена потужність паралельного контуру визначається як $Q_2=S_{\text{н}}\sin\varphi_{\text{н}}$. За цим значенням Q_2 визначаємо ρ_2 і далі ведемо розрахунок фільтра за наведеними вище виразами.

Якщо виконується умова $S_{\text{н}}\sin\varphi_{\text{н}}<\sqrt{\varepsilon}P_{\text{н}}$ або $\text{ctg}\varphi_{\text{н}}\sqrt{\varepsilon}>1$, то розрахунок проводимо за наведеними вище виразами з урахуванням того, що індуктивність навантаження буде частиною індуктивності фільтра L_2.

При $S_{\text{н}}\sin\varphi_{\text{н}}=\sqrt{\varepsilon}P_{\text{н}}$ або $\text{ctg}\varphi_{\text{н}}\sqrt{\varepsilon}=1$ габарити фільтра мінімальні.

Перелік посилань

1. Інвертори і перетворювачі частоти: монографія/ В.І. Сенько, К.В. Трубіцин, В.І. Чибеліс. ─ Київ: Видавництво Ліра-К, 2020. ─ 300 с.

2. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник для студентів вищ. закл. освіти, що навчаються за напрямками "Електромеханіка" та "Електротехніка": У 4-х т. / Сенько В.І., Панасенко М.В., Сенько Є.В., Юрченко М.М., Сенько Л.І., Ясінський В.В. – Харків: Фоліо, 2013. Т.4. Кн.1,2. -315с.

3. Силова перетворювальна техніка. Конспект лекцій «Електронний ресурс: навчальний посібник для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В. І. Сенько, К. В. Трубіцин, В. І. Чибеліс. – Електронні текстові дані (1 файл: 5,02 Мбайт). – Київ : КПІ ім. ІгоряСікорського, 2022. – 241 с.