ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ МАГНІТОЗВ'ЯЗАНИХ LCL-ФІЛЬТРІВ ДЛЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Кацив С.Ш.
к.т.н., доц., доцент, Вінницький національний технічний університет
Мадьяров В.Г.
к.т.н., доц., професор, Вінницький національний технічний університет

Вступ. В системах інвертування сонячних електростанцій для підтримання в припустимих межах коефіцієнту гармонік струму навантаження оптимальним є використання LCL-фільтрів, які, зазвичай, виконуються у вигляді тристрижньової магнітної системи, що має магнітний зв'язок між індуктивностями різних фаз. Для мінімізації вартості та габаритів фільтру є важливим оптимізувати визначення його параметрів виходячи з умови мінімізації коефіцієнту гармонік струму.

Математична модель задачі оптимізації фільтрів

Оптимальні індуктивності фільтрів будуть визначатися за умови, щоб коефіцієнт нелінійних спотворень струму в навантаженні не перевищував 3%. Для цього спочатку знайдемо АЧХ фільтрів відносно струму в навантаженні. За теоремою компенсації еквівалентне навантаження представимо як $\underline{Z}_n = R_n + j\omega L_n$.

Оскільки схема трифазного фільтра є симетричною, для спрощення задачі АЧХ визначаємо для однофазного фільтра (рис. 1). Приймемо, що $L_2 = \frac{L_1}{2}$.

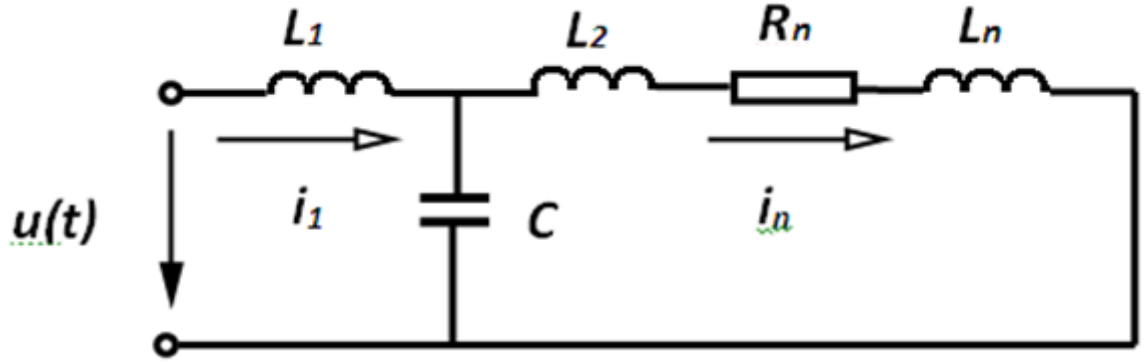


Рисунок 1 – Схема LCL-фільтру

АЧХ фільтра відносно струму в навантаженні є модулем передатної характеристики:

$$\underline{H}_{iu}(j\omega) = \frac{\underline{I}_n(j\omega)}{\underline{U}(j\omega)}. \quad (1)$$

Для її визначення знайдемо спочатку вхідний опір кола:

$$\underline{Z}_{вх}(j\omega) = j\omega L + \frac{\left(\frac{1}{j\omega C}\right)\left[R_n + j\omega\left(\frac{L}{2} + L_n\right)\right]}{\frac{1}{j\omega C} + R_n + j\omega\left(\frac{L}{2} + L_n\right)}, \quad (2)$$

тоді вхідний струм

$$\underline{I}_1(j\omega) = \frac{\underline{U}(j\omega)}{\underline{Z}_{вх}(j\omega)}, \quad (3)$$

а струм у навантаженні

$$\underline{I}_n(j\omega) = \underline{I}_1(j\omega)\frac{\frac{1}{j\omega C}}{\frac{1}{j\omega C} + R_n + j\omega\left(\frac{L}{2} + L_n\right)}. \qquad (4)$$

Провівши алгебраїчні перетворення в середовищі MathCAD, отримаємо передатну характеристику

$$\mathrm{HIn}(\omega, L, Ln, C, Rn, U) := \mathrm{I1}(\omega, L, Ln, C, Rn, U)\cdot\frac{\mathrm{z2}(\omega, C)}{(\mathrm{z2}(\omega, C) + \mathrm{z3}(\omega, L, Ln, Rn))}$$

$$\mathrm{HIn}(\omega, L, Ln, C, Rn, U)\ \text{simplify}\ \rightarrow \frac{-2}{\left(-3\cdot i\cdot\omega\cdot L + 2\cdot\omega^2\cdot L\cdot Rn\cdot C + i\cdot\omega^3\cdot L^2\cdot C + 2\cdot i\cdot\omega^3\cdot L\cdot C\cdot Ln - 2\cdot Rn - 2\cdot i\cdot\omega\cdot Ln\right)}$$

і АЧХ

$$\left|\mathrm{HIn}(\omega, L, Ln, C, Rn, U)\right|\ \text{simplify}\ \rightarrow 2\cdot\left[\frac{1}{\left(\omega^6\cdot L^4\cdot C^2 + 4\cdot\omega^6\cdot L^3\cdot C^2\cdot Ln - 6\cdot\omega^4\cdot L^3\cdot C + 4\cdot\omega^6\cdot L^2\cdot C^2\cdot Ln^2 + \right.\right.$$

$$\left. + 4\cdot\omega^4\cdot L^2\cdot Rn^2\cdot C^2 - 16\cdot\omega^4\cdot L^2\cdot C\cdot Ln + 9\cdot\omega^2\cdot L^2 - 8\cdot\omega^4\cdot L\cdot C\cdot Ln^2 - \right.$$

$$\left.\left. - 8\cdot\omega^2\cdot L\cdot Rn^2\cdot C + 12\cdot\omega^2\cdot L\cdot Ln + 4\cdot\omega^2\cdot Ln^2 + 4\cdot Rn^2\right)\right]^{\frac{1}{2}}$$

На вхід математичної моделі мають надходити такі дані.

1. Спектр діючих значень фазної напруги після інвертора $\lfloor U_{k\phi} \rfloor$ від 1-ї до 50-ї гармонік. Цей спектр може бути заданий як у вольтах, так і у відсотках до першої гармоніки. Його бажано отримувати від вимірювальних приладів, за відсутністю приладів за результатами комп'ютерного моделювання.
2. Фазна діюча напруга навантаження $U_{\phi н}$.
3. Фазний діючий струм навантаження $I_{\phi н}$.
4. Коефіцієнт потужності навантаження $Cos\varphi_н$.
5. Ємність фільтру. Зазначимо, що оскільки ємності трифазного фільтру з'єднані трикутником, слід перевести їх значення в еквівалентну зірку ($C_{зір} = 3C_{трик}$).
6. *Початкові* значення індуктивностей.
7. Граничне значення коефіцієнта нелінійних спотворень струму THD_{max}.

На першому кроці у відповідності з теоремою компенсації визначається еквівалентний опір навантаження.

$$Z_n = \frac{U_\phi}{I_\phi},\quad R_n = Z_n Cos\varphi_н,\quad L_n = R_n tg\varphi_н \qquad (5)$$

На другому кроці згідно виразів (1) – (5) знаходиться передатна характеристика $\underline{H}_{iu}(j\omega)$ і АЧХ $\left|\underline{H}_{iu}(j\omega)\right|$.

На третьому кроці визначається спектр струмів в навантаженні.

$$\forall k = 1.....50\left(I_{kn} = U_{k\phi}\left|\underline{H}_{iu}(jk\omega)\right|\right), \quad (6)$$

На четвертому кроці визначається коефіцієнт нелінійних спотворень струму THD.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{50} I_{kn}^2}}{I_{1n}}, \quad (7)$$

Нарешті далі виконується процедура оптимізації.

$$\left(L \to Min\right)\left(THD \le THD_{\boldsymbol{max}}\right), \quad (8)$$

Програмна реалізація задачі оптимізації фільтру LCL

Програма виконана в середовищі Excel. Фрагмент програми зображено на рис. 2.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	Гарм.	Uкф, %	ω	знаменатель		АЧХ	Ikn, A	Ikn^2	221,42617	THD, %	Uнф, В	Iнф, А	Cosφ	L1, мкГн	L2, мкГн	C, мкФ	Rn, Ом	Ln, мГн	THDmax, %
2	1	100	314	0,788886886		2,2546056	496,01324	246039,1312		2,999999699	220	500	0,95	27,7969821	13,89849103	200	0,418	0,43754763	3
3	2	0,3	628	1,047575017		1,9540579	1,2896782	1,663269906					0,3175604	2,7797E-05	1,389898E-05	0,0006		0,000437548	
4	3	0,25	942	1,471008659		1,6480069	0	0											
5	4	0,75	1256	2,0409804		1,3999609	2,3099354	5,33580175											
6	5	0,11	1570	2,73511537		1,2093226	0,2926561	0,085647575											
7	6	0,68	1884	3,535924749		1,0651076	0	0											
8	7	0,33	2198	4,381012959		0,9555265	0,6937122	0,48123665											
9	8	0,32	2512	5,264187747		0,8716945	0,6136729	0,376594471											
10	9	0,25	2826	6,186427355		0,8073692	0	0											
11	10	0,36	3140	6,957054178		0,7582585	0,6005408	0,360649197											
12	11	0,47	3454	7,685064905		0,72145	0,7459793	0,556485085											
13	12	0,35	3768	8,280617158		0,6950221	0	0											
14	13	0,39	4082	8,706672605		0,6778036	0,5815555	0,338206814											
15	14	0,33	4396	8,930796575		0,6692446	0,4858716	0,236071215											
16	15	0,07	4710	8,927114147		0,6693827	0	0											

Рисунок 2 – Фрагмент програми оптимізації фільтру LCL

Висновок. Оскільки вартість та габаритні розміри LCL-фільтру безпосередньо залежать від значень індуктивностей, то є важливим їх мінімізація, при якій гарантується забезпечення умови для всіх значень струму навантаження.