

на характеристики пристрою та можливості підвищення завадостійкості в часто використовуваних пристроях синхронізації з ФНЧ в колі керування.

1. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. – М., 1977. 2. Ярлыков М.С. Применение марковской теории нелинейной фильтрации в радиотехнике. – М., 1980. 3. Бондарев А.П., Мандзій Б.А. Аналіз граничної завадостійкості системи фазової синхронізації // Теоретична електротехніка. – 1998. – Вип. 54. – С. 14–17. 4. А. с. 1775855. Устройство фазовой автоподстройки частоты / М.С. Мартыниев, А.П. Бондарев, С.Л. Малиновский, М.П. Возняк. Приоритет 15.07.1992. 5. Кантор Л.Я. Помехоустойчивость приема ЧМ сигналов. – М., 1977.

УДК 621.316.761.2

Ю.О. Варецький, Я.С. Пазина, В.М. Амброз
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електричних мереж та систем

ПРОГНОЗУВАННЯ ЧАСТОТНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ З ФІЛЬТРАМИ ВИЩИХ ГАРМОНІК

© Варецький Ю.О., Пазина Я.С., Амброз В.М., 2003

Запропоновано підхід до оцінки параметрів системи фільтрів для електричної мережі, яка живить навантаження зі змінним характером нелінійності. Показано особливості розрахунку для випадку заданого рівня компенсації реактивної потужності та потужності електричної мережі.

The paper shows an approach to estimation of power filters system for electrical network supplying loads having a varying harmonic nonlinearity. The features of the calculation for a reactive power compensation level and for a short circuit level are shown.

Постановка проблеми

Останнім часом спостерігається швидке зростання застосування високовольтних силових фільтрів у системах електропостачання промислових споживачів, що пояснюється своєю чергою зростанням потужностей нелінійних навантажень. Часто ці навантаження мають змінний характер, що висуває додаткові вимоги до проектування системи фільтрів, які призначені для таких мереж. Особливість полягає у тому, що необхідно враховувати не тільки характеристики зміни режиму електричної мережі зі зміною компенсованих струмів гармонік, але оцінювати також і вплив цієї системи фільтрів на струми некомпенсованих гармонік, які можуть мати іноді значні величини. Впровадження статичних тиристорних компенсаторів (СТК), які дозволяють одночасно покращувати декілька показників якості в системах живлення неконвенційних навантажень, висуває в цьому напрямі особливі вимоги. У схемах СТК використовується, як правило, декілька фільтрів вищих гармонік, які прийнято називати фільтро-компенсуючим колом (ФКК), тому доцільний розподіл потужності між окремими фільтрами є важливою технічною і економічною задачею.

Аналіз останніх досліджень

Загальною практикою в проектуванні фільтрів, які призначені для тих чи інших мереж, є використання параметрів усталених режимів, що необхідні для вибору потужностей та параметрів окремих фільтрів [1, 2]. Під час розрахунку параметрів фільтрів вихідними даними є рівень гармонік струму навантаження, допустимі межі відхилення параметрів конденсаторних батарей та реакторів фільтрів, добротність фільтрів, потужність короткого замикання у точці встановлення фільтра. Бажаним також для електричних систем зі значними змінами частоти є врахування цих змін у процедурі розрахунку. Вибраний згідно з такою методикою силовий фільтр не повинен переважуватися діючими напругами та струмами у будь-яких стаціонарних режимах згідно з чинними нормами на конденсатори та фільтрові реактори. Проте такий підхід не дозволяє цілеспрямовано вибрати систему фільтрів у випадку заданого рівня реактивної потужності фільтра та потужності електричної мережі, з попереднім прогнозом частотної характеристики. Це стає особливо актуальним у разі можливої появи певних величин некомпенсованих гармонік у електричній мережі, які можна підсилювати невдало вибраною системою фільтрів.

Задачі досліджень

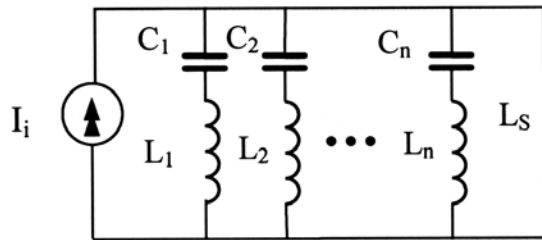
Характерним випадком застосування системи фільтрів у електричній мережі зі змінним нелінійним навантаженням є використання СТК у таких мережах. Генерування реактивної потужності в схемі СТК здійснюється фільтрокомпенсуючим колом, яке є комбінацією певних фільтрів. Як правило, потужність ФКК визначається вимогами компенсації реактивної потужності та несиметрії (заданою реактивною потужністю), а розподіл її між окремими фільтрами та їх кількість – вимогами компенсації несинусоїдності. Крім того, необхідною умовою проектування ФКК є вимоги забезпечення допустимих параметрів режиму в квазіусталених та перехідних станах системи електропостачання. Як показує досвід, оптимальне вирішення цієї проблеми зовсім не є такою простою задачею, як це може видаватися з першого погляду. Основні вимоги, котрі повинні враховуватися під час розробки схеми ФКК у вказаних умовах, можуть характеризуватися такими положеннями:

- результуючий імпеданс мережі зі сторони джерела гармонік повинен бути мінімальним для вибраних частот (для ідеалізованої схеми, яка не враховує втрат, він повинен дорівнювати нулю);
- приглушенню підлягають гармоніки, котрі визначаються з особливостей нелінійності навантаження та чутливості мережі;
- оскільки можлива поява парних гармонік, то в разі відсутності фільтрів на цих частотах, для них потрібно забезпечити можливе зменшення результуючого імпедансу;
- під час розподілу наявної ємнісної реактивної потужності ФКК між окремими фільтрами повинні бути виконані умови попередніх опцій;
- схеми ФКК повинні, по-можливості, бути якомога простішими, забезпечувати приглушення вибраних гармонік у струмі системи, не викликаючи підсилення інших у можливих експлуатаційних режимах мережі;
- необхідність додаткового демпфування у схемі ФКК повинна обґрунтовуватися у конкретних умовах.

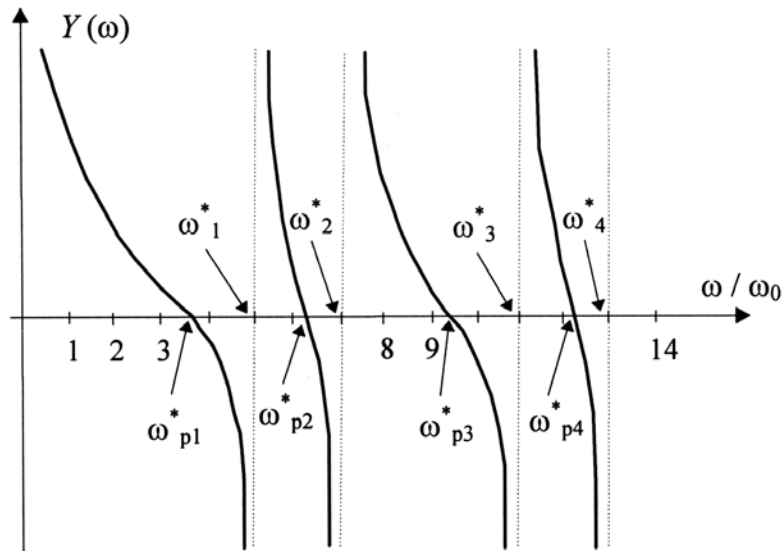
Виклад основного матеріалу

Базуючись на перерахованих положеннях, покажемо підхід, який можна розглядати як перший етап проектування схеми ФКК для вказаних умов. Під час викладу основних положень скористаємося перетвореннями, запропонованими у роботі [3]. Нехай маємо ідеалі-

зовану заступну схему електричної мережі з джерелом вищих гармонік та певною системою фільтрів (рисунок, а). Очевидно, що у цій схемі не враховано втрати. Тут C_1, C_2, \dots, C_n та L_1, L_2, \dots, L_n – відповідно ємності та індуктивності фільтрів ФКК, а I_i – джерело вищих гармонік, яке еквівалентує сумарні струми гармонік нелінійного навантаження та тиристорно-реакторної групи СТК. Індуктивність L_S еквівалентує індуктивність мережі в точці під'єднання фільтрів.



а



б

Розрахункова схема (а) та частотні характеристики (б) мережі з ФКК, яке містить фільтри 5, 7, 11, 13 гармонік

Тоді результуючу вхідну провідність схеми можна подати у вигляді:

$$\begin{aligned}
 Y(\omega) &= \frac{1}{j\omega L_S} \left(1 + \frac{\omega_1^2}{\omega_{S1}^2} + \frac{\omega_2^2}{\omega_{S2}^2} + \dots + \frac{\omega_n^2}{\omega_{Sn}^2} \right) \times \frac{(\omega_{p1}^2 - \omega^2)(\omega_{p2}^2 - \omega^2) \dots (\omega_{pn}^2 - \omega^2)}{(\omega_1^2 - \omega^2)(\omega_2^2 - \omega^2) \dots (\omega_n^2 - \omega^2)} = \\
 &= \frac{A (\omega_{p1}^2 - \omega^2)(\omega_{p2}^2 - \omega^2) \dots (\omega_{pn}^2 - \omega^2)}{j\omega (\omega_1^2 - \omega^2)(\omega_2^2 - \omega^2) \dots (\omega_n^2 - \omega^2)}. \quad (1)
 \end{aligned}$$

У цьому виразі прийнято такі позначення: $\omega_n = 1/\sqrt{L_n C_n}$ – колова частота настроювання n -го фільтра; $\omega_{Sn} = 1/\sqrt{L_S C_n}$ – відносна частота n -го фільтра; ω_{pn} – n -на резонансна частота схеми. Для прикладу на рисунку, б показано частотну характеристику

провідності електричної мережі з ФКК для $n = 4$. Розглядаючи її, можемо бачити, що ω_{pn} відповідає нулям функції провідності ФКК, а ω_n – її полюсам. Заданими умовами під час вибору схеми системи фільтрів ФКК є потужність короткого замикання в "спільній точці", що визначає еквівалентну індуктивність системи:

$$L_S = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{к.з.}} \omega_0} \quad (2)$$

та сумарна потужність ФКК – Q_C , чи її еквівалентна провідність:

$$Y_C = j \frac{Q_C}{U_{\text{НОМ}}^2}. \quad (3)$$

Легко показати, що

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} j\omega Y(\omega) = \frac{1}{L_S}. \quad (4)$$

З іншого боку, використовуючи (1), можна записати

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} j\omega Y(\omega) = A \frac{\omega_{p1}^2 \cdot \omega_{p2}^2 \cdot \dots \cdot \omega_{pn}^2}{\omega_1^2 \omega_2^2 \dots \omega_n^2} \quad (5)$$

або, прирівнюючи (4) та (5), отримаємо:

$$\frac{1}{L_S} = A \frac{\omega_{p1}^2 \cdot \omega_{p2}^2 \cdot \dots \cdot \omega_{pn}^2}{\omega_1^2 \omega_2^2 \dots \omega_n^2}. \quad (6)$$

Якщо для конкретного випадку схеми ФКК встановлено частоти настроювання фільтрів ω_1 , ω_2 , ... ω_n , то можемо вибрати безпечні з огляду на режим електричної мережі нулі функції ω_{p1} , ω_{p2} , ... ω_{pn} . Але, враховуючи обмеження (3), вільно задати можемо тільки $n-1$ резонансну частоту, оскільки це обмеження вимагає виконання такої рівності:

$$j\omega_0 Y_C(\omega_0) + \frac{1}{L_S} = A \frac{(\omega_{p1}^2 - \omega_0^2)(\omega_{p2}^2 - \omega_0^2) \dots (\omega_{pn}^2 - \omega_0^2)}{(\omega_1^2 - \omega_0^2)(\omega_2^2 - \omega_0^2) \dots (\omega_n^2 - \omega_0^2)}, \quad (7)$$

де $\omega_0 = 2\pi f_0 = 314$ 1/с. Далі, на основі рівнянь (6) та (7), попередньо вибравши $n-1$ частоти паралельних резонансів (нулі частотної характеристики провідності системи – ω_{p2} , ω_{p3} , ... ω_{pn}), можемо визначити невідомі величини A та ω_{p1} . Тепер для визначення параметрів L_n та C_n , що задовольняють прогнозованій частотній характеристиці провідності системи, скористаємося алгоритмом. Функцію (1) подамо у вигляді

$$\begin{aligned} Y(\omega) &= \frac{A (\omega_{p1}^2 - \omega^2)(\omega_{p2}^2 - \omega^2) \dots (\omega_{pn}^2 - \omega^2)}{j\omega (\omega_1^2 - \omega^2)(\omega_2^2 - \omega^2) \dots (\omega_n^2 - \omega^2)} = \\ &= \frac{A_0}{j\omega} + \frac{A_1 j\omega}{\omega_1^2 - \omega^2} + \frac{A_2 j\omega}{\omega_2^2 - \omega^2} + \dots + \frac{A_n j\omega}{\omega_n^2 - \omega^2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Тоді значення параметрів окремих фільтрів можна визначити за такими співвідношеннями:

$$L_1 = \frac{1}{A_1}; \quad C_1 = \frac{A_1}{\omega_1^2}; \quad \dots \quad L_n = \frac{1}{A_n}; \quad C_n = \frac{A_n}{\omega_n^2}. \quad (9)$$

Щоб отримати коефіцієнти $A_1, A_2 \dots A_n$, рівняння (8) перетворимо до вигляду

$$\begin{aligned} & A(\omega_{p1}^2 - \omega^2)(\omega_{p2}^2 - \omega^2) \dots (\omega_{pn}^2 - \omega^2) = \\ & A_0(\omega_1^2 - \omega^2)(\omega_2^2 - \omega^2) \dots (\omega_n^2 - \omega^2) - A_1\omega^2(\omega_2^2 - \omega^2) \dots (\omega_n^2 - \omega^2) - \\ & - A_2\omega^2(\omega_1^2 - \omega^2) \dots (\omega_n^2 - \omega^2) - \dots - A_n\omega^2(\omega_1^2 - \omega^2)(\omega_2^2 - \omega^2) \dots (\omega_{n-1}^2 - \omega^2) \end{aligned} \quad (10)$$

і, підставляючи по чергово у нього значення частот настроювання фільтрів (полюсів частотної характеристики), отримаємо:

$$\begin{aligned} A_1 &= -A \frac{(\omega_{p1}^2 - \omega_1^2)(\omega_{p2}^2 - \omega_1^2) \dots (\omega_{pn}^2 - \omega_1^2)}{\omega_1^2(\omega_2^2 - \omega_1^2) \dots (\omega_n^2 - \omega_1^2)}; \\ A_2 &= -A \frac{(\omega_{p1}^2 - \omega_2^2)(\omega_{p2}^2 - \omega_2^2) \dots (\omega_{pn}^2 - \omega_2^2)}{\omega_2^2(\omega_1^2 - \omega_2^2) \dots (\omega_n^2 - \omega_2^2)}; \\ & \dots \\ A_n &= -A \frac{(\omega_{p1}^2 - \omega_n^2)(\omega_{p2}^2 - \omega_n^2) \dots (\omega_{pn}^2 - \omega_n^2)}{\omega_n^2(\omega_1^2 - \omega_n^2)(\omega_2^2 - \omega_n^2) \dots (\omega_{n-1}^2 - \omega_n^2)}. \end{aligned} \quad (11)$$

Значення A_0 визначається еквівалентною індуктивністю мережі

$$A_0 = \frac{1}{L_S} \quad (12)$$

і може бути також отримане з (10) за умови $\omega = 0$.

Тут необхідно зазначити, що під час синтезу системи фільтрів на основі описаного алгоритму потрібно рахуватися з дискретністю вибору ємностей конденсаторних батарей фільтрів, яка зумовлена їх конструктивними характеристиками. Тому після першого етапу розрахунку, уточнюють дійсні ємності фільтрів і розраховують нулі частотної характеристики. Далі, як правило, дослідження режимів роботи СТК з вибраною системою фільтрів здійснюється на відповідних моделях, які враховують характеристики системи [4–6], особливості нелінійності навантаження [7, 8], можливі режими системи електропостачання [1, 2]. Як показали дослідження та аналіз діючих пристроїв, під час проектування ФКК необхідно також враховувати вплив неусталених експлуатаційних режимів мережі та навантаження. Потрібно зазначити, що в деяких системах електропостачання відчутно змінюється значення потужності короткого замикання та частоти зі зміною режиму їх роботи. Це може суттєво впливати на рівень несинусоїдності режиму в таких системах, особливо коли використовуються конденсатори та реактори зі значною мірою розкиду параметрів. На це звертається увага в роботі [2].

Висновки

Вказано особливості опрацювання фільтрів для електричних мереж, які живлять змінні нелінійні навантаження, та фактори, які потрібно брати до уваги у цьому випадку. У роботі показано спосіб оцінки параметрів системи фільтрів за умов заданих структури та сумарної реактивної потужності, характеристики електричної мережі з неконвенційними навантаженнями.

1. Аррилага Д., Бредли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах. – М., 1990. – 320 с. 2. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – М., 1994. – 272 с. 3. Дан А., Дери А., Хорват Р. Фильтрация высших

гармоник и компенсация реактивной мощности в промышленных сетях, питающие выпрямители большой мощности // *Electrotechnika*. – 1977. – № 2. – С. 72–79. (переклад с угор.). 4. Xia D., Heydt G.T. Harmonic power flow studies. Part I, II // *IEEE Trans. on PAS*. – 1982. – Vol. 101, № 6. – P. 1257–1270. 5. Baghzouz Y., Tan O.T. Probabilistic modeling of power system harmonics // *IEEE Trans. on IA*. – 1987. – Vol. 23, № 1. – P. 173–180. 6. McGranaghan M.F., Dugan R.C., King T.A., Tewell W.T. Distribution feeder harmonic study methodology // *IEEE Trans. on PAS*. – 1984. – Vol. 103, № 12. – P. 3663–3670. 7. Варецький Ю.О., Бахор З.М., Равлик О.М. Розрахунок показників якості електроенергії у системі електропостачання тягових підстанцій відкритої копальні // Зб. праць III Міжнар. конф. «Ефективність і якість електро-постачання промислових підприємств». – Маріуполь, 1994, – С. 62–64. 8. Varetsky Y. Exploitative characteristics of static filter circuits // *Proc. of 5-th, Proc. of 6th Int. Conf. Electric power quality and utilization, Cracow, 2001*. – P. 297–302.

УДК 621.313.333

К.М. Василів

Український державний лісотехнічний університет,
кафедра ОТ і МТП

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ ГЕНЕРАТОРА З БЕЗКОНТАКТНИМ ТРИФАЗНО-ТРИФАЗНИМ МОДУЛЬОВАНИМ ЗБУДЖУВАЧЕМ ПРИ РОБОТІ НА АКТИВНО-ІНДУКТИВНЕ НАВАНТАЖЕННЯ

© Василів К.М., 2003

За допомогою математичної моделі проведено дослідження електромагнітних процесів автономної електроенергетичної системи на базі генератора з безконтактним трифазно-трифазним модульованим збуджувачем при роботі на номінальне статичне навантаження. Встановлено закономірності впливу схеми модульованого збуджувача на перебіг електромагнітних процесів у збуджувачі та генераторі.

Research of electromagnetic processes of the noncontact modulated exciter during the work of the generator of stable frequency under nominal static load was carried out with the help of a mathematical model. Objective laws of the influence of the modulated exciter scheme, sliding of the generator, and insertion according to current on electromagnetic process procedure in the noncontact modulated exciter were established.

Постановка проблеми

Аналіз літератури свідчить, що на найближчий час важливим напрямком розвитку електроенергетики є розробка та впровадження у практику використання автономних електроенергетичних систем (АЕЕС). Ядром таких систем служать дизель-генератори, вітроенергетичні та газотурбінні установки. Характерною особливістю АЕЕС є істотна нестійкість обертання рушія (вітроколеса, дизеля, газотурбінного приводу), яка спричиняє