

ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ ЧАТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИХ ЕЛЕКТОПРИВОДІВ І КОНДЕНСАТОРНИХ БАТАРЕЙ

Соколовський О. Ф., к.т.н., Коновалов О. В., ст. викладач, Бушма С. В., асистент

Розглянуто причини виникнення вищих гармонік в електричних мережах, проаналізовано їх вплив на електроустановки та запропоновано методи захисту конденсаторних батарей від резонансу.

Постановка проблеми дослідження. Виникнення вищих гармонік в електричних

мережах є важливою частиною проблеми якості електричної енергії та більш загального поняття – електромагнітної сумісності електрообладнання. Її значення почало зростати протягом останніх 10-15 років у зв'язку зі стрімким розвитком нових технологій, що призвели, з одного боку до росту електроспоживання електроприймачами, які вносять спотворення в мережу (перетворювальні установки, дугові сталеплавильні печі тощо), а з іншого – до широкого розповсюдження електронних систем автоматичного керування технологічними процесами, чутливих до спотворень [1, 13].

Масове впровадження сучасної силової електроніки в різноманітні види обладнання призвело до того, що наявність гармонік в електричних мережах стало серйозно позначатись на всіх секторах економічної діяльності. Крім того, обладнання, яке генерує таке спотворення, часто є критично важливим для підприємства чи організації [2]. До того ж, дуже часто розглянуті електроприймачі є одночасно винуватцями та жертвами порушень електромагнітної сумісності [13].

Враховуючи одночасно збільшення кількості як потужних нелінійних так і чутливих до спотворень споживачів, які з'явилися останнім часом, можна зробити висновок про доречність і своєчасність статті [1, 2].

Мета. Дослідити аномальні процеси, які відбуваються в електричних мережах з транзисторними перетворювачами частоти, з'ясувати основні причини виникнення гармонійних спотворень, проаналізувати вплив вищих гармонік на стан електроустановок, дати оцінку наслідкам такого впливу та запропонувати методи захисту конденсаторних батарей від резонансу.

Аналіз проблеми. Як і багато інших форм спотворень, гармоніки впливають на всі види електричного обладнання, що знаходиться на досить великій відстані від місця генерації гармонік.

В цьому випадку застосування навіть елементарних заходів захисту обладнання у вигляді фільтрів, що встановлюються в споживача, призводить до істотного покращення кривої напруги [4, 5].

Найчастіше в трифазних розподільчих мережах зустрічаються непарні гармоніки. Зі збільшенням частоти амплітуди гармонік, зазвичай, зменшуються. Гармоніки вище 50-го порядку мають незначну амплітуду, тому їх вимірювання не мають сенсу. Достатньо точні результати можна отримати при вимірюванні гармонік до 30-го порядку. Підприємства-постачальники електричної енергії контролюють вміст 3-ї, 5-ї, 7-ї, 11-ї та 13-ї гармонік в мережах живлення. В цілому, достатнім є усунення гармонік нижчих порядків (до 13-го). При більш ретельному контролі враховуються гармоніки до 25-ї включно [2, 11].

Водночас проблема компенсації реактивної потужності завжди займала важливе місце в загальному комплексі питань підвищення ефективності передачі, розподілу та споживання електричної енергії. Правильне вирішення таких завдань значною мірою зумовлює економію грошових і матеріальних ресурсів, підвищення якості електропостачання. Основні питання компенсації реактивної потужності повинні розглядатися з урахуванням сучасних технічних рішень в цій області [6].

Одним із ефективних шляхів зменшення перетоків реактивної потужності та навіть усунення їх повністю, є використання секцій конденсаторних батарей, які встановлюються безпосередньо в місцях споживання реактивної потужності. Обмін енергією, в цьому випадку, буде відбуватися між індуктивністю та ємністю кола. Між індуктивністю та джерелом енергії буде відбуватися обмін тільки некомпенсованою частиною енергії [6].

Забруднення мереж вищими гармоніками небезпечне, зокрема, для конденсаторних батарей тим, що існує небезпека виникнення паралельного резонансу в коливальному контурі, створеному ємністю батареї та індуктивністю споживача (мережі), що, в свою чергу, може призвести до виходу з ладу обладнання керування та захисту конденсаторних батарей і всієї компенсаційної установки [1, 16].

Для вирішення згаданих проблем необхідно в першу чергу вирішити питання проведення точних вимірювань і моделювання мереж живлення, що дозволить виконувати глибокий аналіз складних процесів розповсюдження гармонік в мережах.

Будь-яка безперервна функція, що повторюється на інтервалі T , може бути представлена сумою основної синусоїдної компоненти та серії гармонійних складових більш високого порядку, з частотами, кратними основній частоті.

Ряд Фур'є для періодичної функції $x(t)$ має вигляд [4]:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right], \quad (1),$$

де a_0 – середнє значення функції $x(t)$; a_n та b_n – проекції n -ої гармоніки на дійсну та уявну осі; Вектор n -ої гармоніки:

$$A_n e^{j\varphi_n} = a_n + jb_n, \quad (2)$$

має амплітуду $A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$, та фазовий кут $\varphi_n = \arctg\left(\frac{b_n}{a_n}\right)$.

Основним кількісним показником впливу спотворень, викликаних гармоніками на електроустановки є коефіцієнт несинусоїдності напруги:

$$K_{nc} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_k^2}}{U_1} \cdot 100 \approx \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^n U_k^2}}{U_1} \cdot 100, \quad (3),$$

де U_k – діюче значення напруги k -ї гармоніки; U_1 – діюче значення напруги основної гармоніки; n – номер останньої з гармонік, що враховуються.

У відповідності до державних стандартів [11] значення коефіцієнту несинусоїдності напруги в межах до 5% допустимо на затискачах будь-якого приймача [4].

Основними джерелами гармонік струму в даний час є некеровані та керовані випрямлячі й інвертори з фазовим керуванням. Всі вони поділяються на три групи: 1) потужні перетворювачі, які можуть бути використані, наприклад, в металургії та для передачі постійного струму високої напруги; 2) перетворювачі середньої потужності, подібні тим, що використовуються в промисловості для керування електродвигунами та на залізниці; 3) малопотужні перетворювачі однофазних пристроїв, таких як телевізори, комп'ютери та пристрої підзарядки батарей [7].

Теоретично порядки n гармонік пов'язані з еквівалентною кількістю фаз p випрямляча загальним виразом: $n = pk \pm 1$ (k – ціле додатне число), а їх амплітуди обернено пропорційні порядку гармоніки. Як було зазначено вище, гармоніками порядків, більших за 50 можна знехтувати в зв'язку з малістю їх амплітуд [4].

Наприклад, для трифазної мостової схеми гармоніки напруги мають порядки $n = 6k$. З ростом α (кут керування, ел. град.), амплітуди гармонік більш високих порядків збільшуються швидше. Використання силових транзисторів і тиристорів дозволяє застосовувати перетворювачі в області керування двигунами змінного струму.

Керування інверторами здійснюється за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Цей метод використовується для регулювання тривалості вмикання напівпровідникових ключів і полягає в перериванні вихідної напруги інвертора з метою керування напругою основної частоти [8].

Зниження гармонік нижчих порядків може бути отримано комплексною ШІМ за рахунок збільшення перемикаючої здатності інвертора. Проблема полягає у виборі такої стратегії керування ШІМ, яка дозволяла б отримати необхідну лінійну залежність напруги від частоти та знизити гармонійні струми або мінімізувати втрати від гармонік [3].

Всі потужні перетворювальні схеми складаються з комбінацій основних трифазних груп, а вирази для їх гармонік можуть бути отримані з аналізу спектрів трифазних перетворювачів з фазовим керуванням. Таким чином, трифазна крива при довільній системі керування кутами вмикання становить інтерес для подальших досліджень [4].

Основними формами впливу вищих гармонік на системи електропостачання є:

а) збільшення струмів і напруг гармонік внаслідок паралельного та послідовного резонансів; б) зниження ефективності процесів генерації, передачі та використання електроенергії; в) старіння ізоляції електрообладнання та скорочення внаслідок цього терміну його служби; г) помилкова робота обладнання [1, 2, 3, 7, 14].

Присутність в мережах конденсаторів, які використовуються для компенсації реактивної потужності, як зазначалось раніше, може призвести до місцевих резонансів, які, в свою чергу, можуть викликати надмірне збільшення струму в конденсаторах та вихід їх з ладу.

Паралельний резонанс виникає внаслідок високого опору гармонікам струму на резонансній частоті. Так як більшість гармонік є джерелами струму, це викликає збільшення падіння напруги гармонік та їх великі струми в кожній з паралельних гілок.

При послідовному резонансі великий струм гармоніки може протікати через конденсатор при відносно невеликій напрузі гармоніки.

Існує три різні способи ослаблення гармонік [1]:

- модифікація електроустановки;
- застосування спеціальних пристроїв у системі електроживлення;
- фільтрація.

Щоб обмежити поширення гармонік у розподільчій мережі, існують різні рішення, які повинні враховуватися особливо при проектуванні нової електроустановки. Гармонійні спотворення напруги збільшуються зі зменшенням потужності короткого замикання. Не враховуючи всіх економічних міркувань, бажано переважно приєднувати нелінійні навантаження як можна ближче до джерела живлення.

При розробці однолінійної схеми нелінійні пристрої повинні бути відокремлені від інших. Ці дві групи пристроїв повинні житись від окремих систем шин. Для обмеження вмісту гармонік в мережі можна також використовувати джерело живлення з окремим трансформатором. Недолік цього способу полягає в підвищенні вартості електроустановки.

Різні з'єднання обмоток трансформатора дозволяють усунути певні гармоніки, наприклад:

- застосування трифазного трансформатора з двома вторинними обмотками, одна з яких з'єднана в зірку, а інша в трикутник дозволяє зменшити п'яту та сьому гармоніки в первинній обмотці;

- з'єднання типу «трикутник-зірка» зменшує третю гармоніку.

При живленні частотно-регульованих приводів встановлення лінійних реакторів дозволяє згладити форму струму. Збільшення повного опору мережі живлення обмежує вміст гармонік струму. Встановлення послідовно з батареями конденсаторів реакторів збільшує повний опір комбінації «реактор-конденсатор» для вищих гармонік. Це усуває резонанс і захищає конденсатори.

Також необхідно вірно вибирати відповідну систему заземлення установки. В системі TN-C по провіднику PEN протікають струми, викликані нерівномірним навантаженням по фазах. У сталому режимі по провіднику PEN протікають струми гармонік. Оскільки він має певний опір, то незначні зміни потенціалу (декілька вольт) між пристроями можуть призвести до збоїв у роботі електронних приладів. Тому система TN-C повинна використовуватися тільки для живлення силових кіл в головній частині мережі та не повинна застосовуватися для живлення чутливих споживачів.

Система TN-S. Дану систему рекомендується застосовувати при наявності в живильній мережі гармонік. Нульовий провідник і захисний провідник (PE) повністю відокремлені один від одного, і тому розподіл потенціалів по мережі є більш рівномірним.

У випадках, коли описані вище превентивні заходи виявляються недостатніми, необхідно обладнати електроустановку системами фільтрації. Існують три типи фільтрів [3]: пасивні, активні, гібридні.

Критерії вибору фільтра наступні [1]. Пасивний фільтр. Забезпечує компенсацію

реактивної потужності та ефективну фільтрацію гармонік струму. Такі фільтри також знижують рівень гармонік напруги в електроустановках, в яких форма напруги живлення відрізняється від синусоїдної. Якщо генерована фільтром реактивна потужність велика, то рекомендується відключати встановлений пасивний фільтр в ті періоди часу, коли коефіцієнт завантаження установки є низьким.

Активні компенсатори гармонік. Забезпечують зниження амплітуд гармонік в широкому діапазоні частот і можуть працювати з будь-яким типом навантаження. З іншого боку, потужності даних пристроїв є низькими.

Гібридні фільтри. Поєднують у собі переваги активних і пасивних фільтрів. В електричних системах фільтри застосовуються перш за все для того, щоб зменшити амплітуду струмів або напруг однієї або декількох фіксованих частот (паралельні фільтри) [4].

Коли ж необхідно уникнути проникнення струмів певної частоти в окремі вузли перетворювальної підстанції або в частину енергетичної системи (як, наприклад, у випадку пульсації сигналів керування), використовується послідовний фільтр, що складається з паралельно ввімкнених конденсатора та котушки індуктивності, що створюють великий опір протіканню струму на обраній частоті. Однак таке рішення не може бути застосовано для обмеження рівня гармонік самого джерела, оскільки генерація гармонік нелінійними елементами підстанції (наприклад, трансформаторами та статичними перетворювачами) є невід'ємною рисою їх нормальної роботи.

Що стосується самих статичних перетворювачів, то, зазвичай, в них повинно бути вжито заходів з обмеження проникнення гармонік струму в систему за допомогою створення короткозамкнутого шляху з малим опором для гармонійних частот. В принципі, можливе створення комбінованих послідовних і паралельних фільтрів для мінімізації гармонік струму та напруги, однак для цього необхідні великі витрати [2].

Через складність і велику вартість фільтрів було розроблено декілька інших способів керування гармоніками. До них відносяться: усунення за допомогою компенсації магнітного потоку, усунення за допомогою генерації додаткових гармонік і усунення за допомогою пульсацій постійного струму.

Необхідно відзначити, що промислово більш розвинуті країни зіткнулися з проблемою, що розглядається, значно раніше. Але, незважаючи на це, «панацеї» на сьогоднішній день не існує. Своєрідним «гальмом» є тенденція розгляду питання в площині показників якості електроенергії з традиційною прив'язкою до відносин «енергопостачальна організація – споживач». Ця тенденція характерна для Західної Європи і Росії. Значно більш правильним здається північноамериканський підхід, реалізований в рекомендаційному стандарті США IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis (IEEE Brown book) (ANSI) IEEE Std 399-1997. Відмінною рисою такого підходу є переадресація відповідальності на рівень виробників електроустаткування, проєктантів та постачальників технологічних комплексів [12].

Висновки. Аналіз попередніх досліджень та публікацій свідчить про те, що проблема несинусоїдності напруги та струму є актуальною. Розглянуті існуючі методи боротьби не дають можливості повністю усунути вищі гармоніки, водночас впровадження таких методів і заходів часто економічно не вигідне. Тому постає завдання розробити такий закон керування ключами інвертора перетворювача частоти, реалізація якого дала б змогу зменшувати вищі гармоніки в процесі роботи перетворювача без суттєвої зміни в конструкції електроустановки та без значних фінансових затрат зі сторони споживачів електричної енергії.

Використані джерела інформації

1. Гармонические искажения в электрических сетях и их снижение // Техническая коллекция Schneider Electric. Выпуск №22, 2008. – 32 с. Режим доступа: <http://www.schneider->

electric.ru.

2. Руководство по устройству электроустановок 2009 // Техническая коллекция Schneider Electric. Выпуск №1, 2009. – 469 с. Режим доступа: <http://www.schneider-electric.ru>.

3. Арриллага Дж. и др. Гармоники в электрических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.

4. Иванов В.С., Соколов В.И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.

5. Трехфазный привод. Основы. Издание 00.00.000-5E06 12/96. – КЕВ. ANTRIEBSTECHNIK. – 88 с.

6. Зайцев Г.З., Константинов Б.А. Компенсация реактивной мощности. – Л.: «Энергия», 1976. – 104 с.

7. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.

8. Фираго Б.И. Теория электропривода. – Мн.: ЗАО «Техноперспектива», 2004. – 527 с.

9. М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер. Общий курс электропривода. – М.: Энергоиздат, 1981. – 578 с.

10. Кацман М.М. Электрические машины. – М.: Высш. шк., 1990. – 463 с.

11. ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

12. Эпидемия высших гармоник в системах электроснабжения. Г.С. Кривенко, С.А. Шаповалов, ООО «КП ЭНРИ». Режим доступа: <http://www.kpenri.com.ua/pr02.htm>.

13. Жаркін А.Ф. Електромагнітна сумісність в низьковольтних електричних мережах з нелінійними споживачами: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук : спец. 05.14.02 «Електричні станції, мережі і системи»/ А.Ф. Жаркін. — Київ, 2004. — 32 с.

14. Обследование режимов электропотребления и показателей качества электроэнергии для решения различных проблем электроснабжения. ООО «КП ЭНРИ». Режим доступа: <http://www.kpenri.com.ua>.

15. Борьба с резонансом. Войцех Пясецкий, Марек Флорковский, Марек Фульчик и др. АББ Ревю 4/2005.