

УДК 621.311

І.В.ПАНТЕЛЄЄВА, канд. техн. наук, Ю.С.ОЛІЙНИК, канд. пед. наук
Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків

**ОСОБЛИВОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ
ПРИСТРОЯМИ СИЛОВОЇ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ
ПРОМИСЛОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ**

Розглядається сучасний стан застосування перетворення частоти для двигунів, що дозволяє використовувати їх для приводу механізмів з підвищеною частотою обертання, крім додавання їм регульованих властивостей.

Рассматривается современное состояние применения преобразования частоты для двигателей, что позволяет использовать их для привода механизмов с повышенной частотой вращения, кроме придания им регулировочных способностей.

The modern state of application of transformation of frequency is examined for engines, that allows to use them for the drive of mechanisms with an overspeed, except for giving by it regulation capabilities.

Ключові слова: гармоніки струму мережі, перетворювач, електричний двигун, електропривод, електрична мережа, втрати потужності.

Джерело реактивної потужності є джерелом гармонік струму, частоти яких у загальному випадку залежать від частоти сигналів управління, що впливають на силові вентилялі схеми та параметри елементів. У кривих струмів відсутні парні гармоніки, спектри різних фаз можуть значно відрізнятися друг від друга. Гармоніки можуть бути також некратними частоті мережі.

При роботі синхронних і асинхронних двигунів в умовах несинусоїдальної напруги виникають додаткові втрати потужності, обумовлені вищими гармоніками струму в обмотках статора і ротора. З'являються також додаткові втрати в сталі статора і ротора, однак цими втратами можна знехатати. Основна частина додаткових втрат доводиться на частку заспокоїливої й статорної обмоток, втрати в обмотці ротора, як правило, виявляються меншими. В асинхронних двигунах високої напруги втрати в статорі й роторі приблизно однакові.

В системах електропостачання у зв'язку із збільшенням систем, що працюють в імпульсному режимі, нелінійних навантажень, напівпровідникових перетворювачів і тому подібне виникає високий рівень вищих гармонік.

Значне число робіт [3-5] присвячене розгляду особливостей регулювання електродвигунів пристроями силової перетворювальної техніки промислового електроприводу.

З'ясовано [1,2], що вищі гармоніки живлячої напруги не роблять значного впливу на механічні характеристики двигуна, тому в більшо-

сті випадків при розрахунках електромагнітних процесів в частотно-регульованому АД розглядається лише дія основної гармоніки живлячої напруги.

Метою статті є аналіз впливу гармонік на втрати електроенергії у двигунах різного типу, а також розробка заходів по підвищенню енергетичних показників і зменшення впливу електроприводів на мережу.

Оцінка втрат від вищих гармонік у синхронних двигунах виконується по кривим (рис. 1), на яких представлені відносини цих втрат $\Delta P_{дл}$ при напрузі, рівної 1% напруги основної частоти, до сумарних номінальних втрат ΔP_n . Величина ΔP_n дається в паспортних даних електродвигунів. Двигуни, зазначені на рисунку, мають шихтовані статор і ротор.

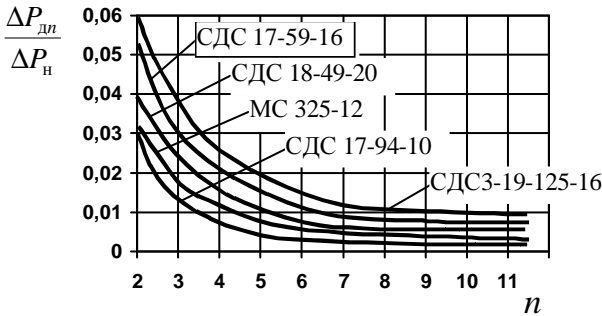


Рис. 1 – Криві для середнього значення питомих втрат, розрахованих для випадку прямого й зворотнього проходження фаз векторів напруги гармонік

Питомі втрати для однієї гармоніки будуть різними залежно від того, яку послідовність утворить система векторів напруги цієї гармоніки, оскільки різною виявляється частота струмів у роторі та заспокійливій системі. На рис. 1 криві побудовані для середнього значення питомих втрат, розрахованих для випадку прямого й зворотнього проходження фаз векторів напруги гармонік. З розгляду кривих видно, що відношення $\Delta P_{дл} / \Delta P_n$ має найбільше значення на частотах гармонік низького порядку, у першу чергу другого й третього. Втрати на частотах гармонік вище 13-ї досить малі, і в розрахунках ними можна знехувати [1].

Сумарні втрати $\Delta P_{\Sigma n}, \%$, обумовлені всіма гармоніками напруги, визначають по формулі

$$\Delta P_{\Sigma n} = \sum_{n=2}^l \Delta P_{дн} \left(\frac{U_n}{U_1} \right)^2. \quad (1)$$

Розрахунки показують, що навіть у випадках неприпустимих перепадів напруги ($k_{nc} = 10 \div 15\%$) додаткові втрати від гармонік у синхронних двигунах із шихтованими статором і ротором не перевершують декількох відсотків номінальних втрат. Це значно менше припустимого значення додаткових втрат, що становить 0,25-0,4% номінальної активної потужності двигунів потужністю вище 1000 кВт. Тому перегрів явнополюсних синхронних двигунів із шихтованими полюсами на промислових підприємствах не спостерігався [2].

Втрати від вищих гармонік у синхронних двигунах з масивними полюсами виявляються значно більшими. Робота таких двигунів при несинусоїдальній напрузі чревата небезпекою недопустимого перегріву й uszkodження обмотки збудження. Рівною мірою це ставиться й до синхронних компенсаторів, що мають масивні полюси. Синхронні компенсатори, установлені в мережах підприємств із високим рівнем гармонік, повинні мати шихтовані полюси. Електропромисловість серійно такі компенсатори не виготовляє.

Додаткові втрати в асинхронному двигуні, обумовлені струмом n -ї гармоніки

$$\Delta P_{дн} = 3I_n^2 (r_{1n} + r'_{2n}), \quad (2)$$

де r_{1n} й r'_{2n} – відповідно активний опір статора й наведений активний опір ротора на частоті n -ї гармоніки.

При підвищених частотах в обмотках статора й ротора різко проявляється поверхневий ефект, тому

$$r_{1n} = r_1 \sqrt{n}; \quad r'_{2n} = r'_2 \sqrt{n}. \quad (3)$$

Для асинхронних двигунів високої напруги можна вважати, що $r_1 = r'_2$

Виразивши струм n -ої гармоніки через номінальний струм двигуна й кратність λ_n пускового струму, розрахункову формулу для визначення сумарних втрат від вищих гармонік можна представити у вигляді:

$$\Delta P_{\Sigma n} = V_{1н} \lambda_n^2 \sum_{n=2}^l \left(\frac{U_n}{U_1} \right)^2 (\sqrt{n} + \sqrt{n \pm 1}) = V_{1н} \sum_{n=2}^l k_{дн}, \quad (4)$$

де $k_{дн}$ – коефіцієнт, що враховує зростання втрат у міді за рахунок n -ї тимчасової гармоніки.

Номинальні втрати в міді статора синхронних двигунів потужністю вище 1000 кВА становлять у ньому 20% загальної суми втрат ΔP_H . З врахуванням цього на рис. 2 дана друга вісь ординат на якій представлені значення $\Delta P_{дп} / \Delta P_H$.

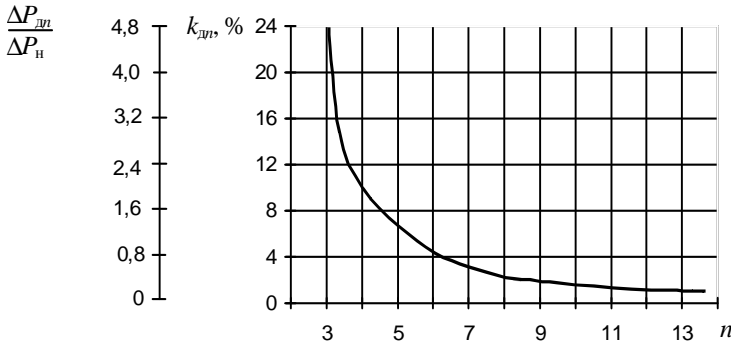


Рис. 2 – Значення $\Delta P_{дп} / \Delta P_H$ з показом другої вісі ординат

Втрати у двигунах можна знизити, використавши імпульсні перетворювачі. У тиристорних перетворювачах ШІМ здійснюється на частотах 0,4-1 кГц, а в транзисторні більше 10 кГц. Вищі гармонійні з такими частотами добре демпфуються індуктивними опорами обмоток двигуна. Однак з ростом частоти ростуть втрати в перетворювачі. На практиці частоту вибирають такою, щоб збільшення втрат у перетворювачі компенсувалося за рахунок їхнього зниження у двигуні [4].

Втрати активної потужності від струмів вищих гармонік у трансформаторах виражаються формулою

$$\Delta P_{\Sigma n} = 3 \sum_{n=2}^l I_{пт}^2 r_k k_{пт} , \quad (5)$$

де $I_{пт}$ – струм n -ї гармоніки, що проходить через трансформатор; r_k – опір короткого замикання трансформатора при промисловій частоті; $k_{пт}$ – коефіцієнт, що враховує збільшення опору короткого замикання для вищих гармонік внаслідок впливу поверхневого ефекту й ефекту близькості. Для силових трансформаторів можна прийняти $k_{5т} = 2,1$; $k_{7т} = 2,5$; $k_{11т} = 3,2$; $k_{13т} = 3,7$.

У теперішній час застосовують наступні методи регулювання якості електроенергії й зменшення впливу на мережу вентильних електроприводів:

- використання традиційних способів компенсації реактивної енергії. До них ставляться синхронні двигуни й компенсатори, а також батареї конденсаторів;

- застосування багатофункціональних пристроїв – силових резонансних фільтрів. До них ставляться: фільтрокомпенсуючі (ФКП) і фільтросиметруючі (ФСП) пристрої; пристрої «акумуляторна батарея – перетворювач»; коректори потужності; статичні тиристорні компенсатори. Перераховані пристрої забезпечують одночасно компенсацію реактивної потужності, фільтрацію вищих гармонік, зменшення відхилень і коливань напруги і його симетрування по фазах;

- зниження рівнів гармонік засобами живильної мережі;

- використання спеціальних засобів управління й схемних рішень вентильних перетворювачів;

• застосування систем управління вентильними перетворювачами, що дозволяють поліпшити енергетичні показники електропривода.

Синхронні двигуни (СД) є ефективним засобом компенсації реактивної потужності в системі електропостачання. Виконуючи свою основну функцію приводного двигуна, СД одночасно можуть генерувати в мережу реактивну потужність, тобто працювати з випереджальним $\cos\phi$. Це забезпечується відповідним регулюванням їхнього струму збудження.

Синхронні компенсатори призначені для компенсації коефіцієнта потужності мережі й підтримки нормального рівня напруги мережі в районах зосередження споживчих навантажень. Нормальним є перебудований режим роботи синхронного компенсатора, коли він віддає в мережу реактивну потужність.

У зв'язку з цим компенсатори, як і батареї конденсаторів, встановлені на споживчих підстанціях, називають також генераторами реактивної потужності. Однак у періоди спаду споживчих навантажень (наприклад, уночі) нерідко виникає необхідність роботи синхронних компенсаторів також у недозбудженому режимі, коли вони споживають із мережі індуктивний струм і реактивну потужність. У цьому випадку напруга мережі прагне зрости й для підтримки його на нормальному рівні необхідно завантажити мережу індуктивними струмами, що викликають у ній додаткові спадання напруги. Для цього кожний синхронний компенсатор забезпечується автоматичним регулятором збудження, що підтримує напругу на виводах компенсатора постійною [5].

Синхронні компенсатори позбавлені приводних двигунів і з погляду режиму своєї роботи, по суті, є синхронними двигунами, що працюють на холостому ходу. Тому синхронні компенсатори заванта-

жені також невеликим активним струмом і споживають із мережі активну потужність для покриття своїх втрат. Компенсатори будуються на потужність до $S_n = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ й мають явнополосну конструкцію, звичайно з $2p = 6$ або 8 .

Номінальна повна потужність синхронного компенсатора $S_n = mU_n I_n$ відповідає його роботі з перезбудження. Найбільші значення струму й потужності в недозбудженому режимі виходять при роботі в реактивному режимі з $i_f = 0$ і $E = 0$. Якщо зневажити втра-

тами, то, при $I_{нв} = \frac{E - U_n}{x_d} = \frac{U_n}{x_d}$, повна потужність становить

$$S_{нв} = mU_n I_{нв} = \frac{mU_n^2}{x_d}. \quad (6)$$

при $x_{d*} = 1,5 \div 2,2$ й $\frac{S_{нв}}{S_n} = 0,45 \div 0,67$.

У більшості випадків у недозбудженому режимі потрібні менші потужності, чим у перезбудженому, і зазначені вище значення задовольняють експлуатаційним вимогам, але в деяких випадках необхідна більша потужність $S_{нев}$. Цього можна досягти збільшенням зазору, що, однак, приводить до подорожчання машини, і тому останнім часом ставиться питання про використання режиму з негативним струмом збудження. При цьому $E < 0$, внаслідок чого $I_{нев}$ збільшується. Оскільки синхронний компенсатор по активній потужності завантажений тільки втратами, то він може працювати стійко також з невеликим негативним збудженням [3].

В ряді випадків у маловодні періоди для роботи в режимі компенсаторів використовуються також генератори гідроелектростанцій.

Конденсатори являють собою спеціальні ємності, призначені для виробництва реактивної потужності. Конденсатори, в порівнянні з іншими джерелами реактивної потужності, мають такі переваги, як малі втрати реактивної потужності, простота монтажу й експлуатації. До їхніх недоліків відносяться залежність генеруємої потужності від напруги, недостатня міцність при перевантаженнях по струму й напрузі, а також погіршення їхньої роботи в мережах з підвищеним змістом вищих гармонік.

Висновки

1. Застосування перетворення частоти дозволяє використати двигуни для привода механізмів з частотою обертання. Такі двигуни в

ряді випадків передають виконавчим механізмам нові функціональні й параметричні можливості, виконавчі механізми швидкохідних машин мають менші розміри й масу, а відповідно й ціну, чим їхні тихохідні аналоги. Науково-технічними підрозділами вирішені проблеми підшипникових вузлів, що виникають при експлуатації механізмів з високою частотою обертання.

2. Проведені дослідження застосування частотно-регульованих електромеханічних систем у низькооборотних механізмах (вентилятори градирень, рольганги, кранові лебідки). Тут багатополюсні, що володіють низькими енергетичними характеристиками, двигуни замінюються енергоефективними. Проведений аналіз дає підставу вважати цей напрямок робіт досить перспективним.

3. Однієї з найбільш успішних сфер застосування частотно-регульованих електромеханічних систем є клас механізмів з важкими умовами пуску. До нього відносяться механізми з великими інерційними масами або з великими значеннями статичного навантаження на проміжних – від нульової до синхронної – частотах обертання (млини, конвеєри, інше). Використання частотного пуску механізмів цього класу крім усунення кидків струму й посадок напруги в мережі, дозволяє істотно спростити конструкцію двигуна: при частотному пуску немає небезпеки перегріву й деформаційного руйнування обмоток статора, а також виплавлення або розпаювання клітки короткозамкненого ротора, що виникає при прямому пуску.

4. Хороший результат отриманий при заміні кранових двигунів з фазним ротором потужністю від 110 до 200 кВт частоти обертання 600 хв^{-1} частотно-регульованою електромеханічною системою «асинхронний двигун з короткозамкненим ротором + перетворювач частоти».

1. Ильинский Н.Ф. Энергосбережение в электроприводе / Н.В. Ильинский. – М.: Высшая школа. – 1989. – 127 С.

2. Мамалига В.М. Энергосбережения в системах электропривода / В.М. Мамалига. – К.: Энергетичний центр ЄС у Києві, 1995. – 86 с.

3. Жежеленко І.В. Вищі гармоніки в системах електропостачання промислових підприємств / І.В. Жежеленко. – 2-й вид., перероб. і доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.

4. Москаленко В.В. Автоматизований електропривод / В.В. Москаленко. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 416 с.

5. Довідник по автоматизованому електроприводі / під ред. В.А. Єліссєва, А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.

Отримано 26.02.2013