

Л. Б. Терешкевич, к. т. н, доц.; Т. М. Червінська

ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНИХ ЗНАЧЕНЬ ПАРАМЕТРІВ НЕСИМЕТРІЇ ЕЛЕКТРИЧНОГО РЕЖИМУ З УМОВИ ДОПУСТИМОГО НАГРІВУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Розроблено методику визначення допустимого рівня несиметрії напруги в темпі процесу керування. Показано вплив зміни аргументу напруги зворотної послідовності на тепловий стан обмоток статора асинхронних двигунів.

Ключові слова: несиметрія напруги, асинхронний двигун, напруга зворотної послідовності, кут зсуву між напругами прямої та зворотної послідовностей, тепловий стан.

Постановка завдання дослідження

Як засвідчує практика, для сучасного стану електричних мереж характерна несиметрія режиму, що негативно позначається на роботі як технологічного, так і електричного обладнання.

Вивченню характеристик електрообладнання, у тому числі й асинхронного двигуна (АД) за умов його під'єднання до несиметричної напруги, присвячено велику кількість наукових робіт. Характерним для всіх цих досліджень є те, що вони спрямовані на оцінку збитків, пов'язаних із несиметрією режиму [1, 2], або на визначення можливості експлуатації, наприклад, асинхронних двигунів за умов, які склалися [3 – 5]. Для потреб керування електричними режимами, в результаті чого відбувається зміна параметрів несиметрії (симетрування напруги або струму, компенсації реактивної потужності в умовах несиметрії напруги), важливою стає інформація про допустимі значення для параметрів, якими прийнято оцінювати несиметричний режим. Такі допустимі значення повинні забезпечуватися в процесі керування, а визначатися, виходячи з умов нормальної роботи, найбільш вразливого до несиметрії напруги електрообладнання, – асинхронних двигунів.

Використання батарей статичних конденсаторів (БСК) симетричного виконання при несиметричних напругах збільшує значення показників несиметрії напруги, і за певних умов ці показники набувають недопустимих значень. У зв'язку з цим виникає необхідність враховувати цю обставину в процесі керування, обмежуючи значення коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності ($k_{2U\text{дон}}$), безпосередньо в точці під'єднання БСК для електричного обладнання, що знаходиться поблизу цього вузла. Під $k_{2U\text{дон}}$ розумітимемо таке його значення, якому в сукупності з іншими параметрами, що сформувалися на момент прийняття рішення та які визначають умови експлуатації АД, відповідає допустимий нагрів електричної машини. Звернемо увагу, що низка параметрів, які визначають нагрів АД (напруга у фазах, коефіцієнт завантаження двигуна, температурні показники навколишнього середовища), зазвичай з різних причин змінюються в часі і, як наслідок, $k_{2U\text{дон}}$ також є функцією часу.

Згідно з ГОСТ 13109-97 несиметрія напруги нормується в точці під'єднання споживача до електричних мереж енергосистеми (далі точка 1, рис. 1) [6]. Проте значення коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності в точці 1 – $k_{2U(1)}$ і в точках під'єднання АД до електричних мереж споживача (далі точка 2, рис. 1) – $k_{2U(2)}$ можуть значно відрізнитись. Якщо несиметрія зумовлена однофазними електроприймачами, під'єднаними до мереж споживача, то $k_{2U(2)} > k_{2U(1)}$, а якщо зі сторони мереж енергопостачальної організації, то

$$k_{2U(2)} < k_{2U(1)}.$$

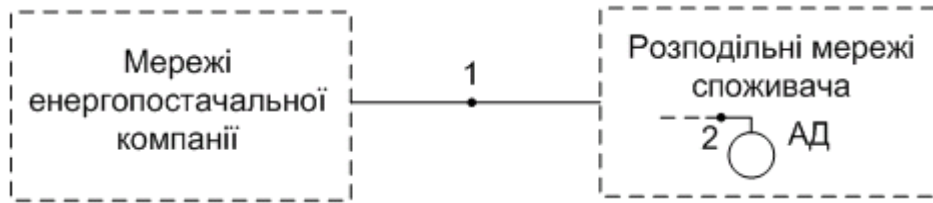


Рис. 1. Узагальнена схема електричних мереж: 1 – вузол під'єднання мереж споживача; 2 – вузол під'єднання АД

Природно, що норми, встановлені ГОСТ 13109-97, для оперативного керування електричними режимами не може бути використано. Однією із умов забезпечення як максимальної ефективності пристроїв, які оптимізують, так і надійної роботи АД, є можливість оперативного визначення $k_{2U_{дон}}$, або допустимого (граничного) значення напруги зворотної послідовності $U_{2_{дон}}$, яка відповідає $k_{2U_{дон}}$.

Метою цієї статті є розробка методики визначення граничних значень напруги зворотної послідовності в точках під'єднання асинхронного двигуна до електричних мереж споживача для підвищення ефективності керування оптимізуючими пристроями і надійної роботи АД.

Розробка методики для оперативного визначення $U_{2_{дон}}$

Допустиме значення напруги зворотної послідовності в точці 2 можна розрахувати з умови нагріву ізоляції обмоток двигуна, використовуючи метод еквівалентних гріючих втрат. Цей метод ґрунтується на принципі суперпозиції (накладанні перевищень температури, що створюються кожним видом втрат) [7]:

$$\Delta t_{ел1} = k_{ел1} \cdot \Delta P_{ел1} + k_{ст} \cdot \Delta P_{ст} + k_{ел2} \cdot \Delta P_{ел2} + k_{мех} \cdot \Delta P_{мех} + k_{д} \cdot \Delta P_{д}, \quad (1)$$

де $\Delta t_{ел1}$ – перевищення температури обмотки над температурою оточуючого повітря; $k_{ел1}$, $k_{ел2}$, $k_{ст}$, $k_{мех}$, $k_{д}$ – коефіцієнти, що характеризують вплив на нагрівання обмотки статора втрат в обмотках статора, ротора, втрат в сталі, механічних і додаткових втрат; $\Delta P_{ел1}$, $\Delta P_{ел2}$ – втрати в обмотках статора та ротора; $\Delta P_{ст}$ – втрати у сталі; $\Delta P_{мех}$ – механічні втрати; $\Delta P_{д}$ – додаткові втрати у двигуні.

Коефіцієнти $k_{ел1}$, $k_{ел2}$, $k_{ст}$, $k_{мех}$, $k_{д}$ можуть бути визначені експериментально або як функції від частоти обертання основних розмірів осердя і корпусу двигуна [7].

Втрати $\Delta P_{ст}$, $\Delta P_{мех}$ – це постійні складові втрат. $\Delta P_{д}$ – незначні за величиною і їхньою зміною можна нехтувати. Напруга U_2 в точці 2 суттєво позначається на втратах в обмотках статора і ротора АД, оскільки опір струмам зворотної послідовності в 5 – 8 разів менший за опір струмів прямої послідовності. Незначна несиметрія напруги викликає значні струми зворотної послідовності і додаткове нагрівання обмоток.

Несиметричну систему струмів представимо системою симетричною рівноцінною за тепловим ефектом по обмотці тієї фази, яка найбільше нагрівається. Це дає можливість використати в дослідженнях метод еквівалентних гріючих втрат, який призначений для випадку, коли АД під'єднаний до симетричної напруги.

Можна припустити, що для ефективного керування електричними режимами за допомогою конденсаторних установок, необхідно мати інформацію не тільки про модуль $U_{2_{дон}}$, але і про його фазу.

Втрати в обмотках статора та ротора АД залежать від квадратів струмів, що протікають в обмотках статора і ротора відповідно:

$$\Delta P_{en1} = 3 \cdot m_T \cdot I_1^2 \cdot r_l = 3 \cdot m_T \cdot \left(\dot{I}_1^{(1)} + \dot{I}_1^{(2)} \right)^2 \cdot r_l, \quad (2)$$

$$\Delta P_{en2} = 3 \cdot m_T \cdot I_2^2 \cdot r_2 = 3 \cdot m_T \cdot \left(\dot{I}_2^{(1)} + \dot{I}_2^{(2)} \right)^2 \cdot r_2, \quad (3)$$

де m_T – коефіцієнт приведення до розрахункової робочої температури, що відповідає класу нагрівостійкості обмоток двигуна; I_1, I_2 – струми в обмотках статора та ротора відповідно; $\dot{I}_1^{(1)}, \dot{I}_1^{(2)}, \dot{I}_2^{(1)}, \dot{I}_2^{(2)}$ – вектори струмів прямої та зворотної послідовностей обмоток статора і ротора відповідно, які визначаються за формулами:

$$\dot{I}_1^{(1)} = \frac{\dot{U}_1^{(1)}}{\underline{z}^{(1)}}, \quad (4)$$

$$\dot{I}_1^{(2)} = \frac{\dot{U}_1^{(2)}}{\underline{z}^{(2)}}, \quad (5)$$

$$\dot{I}_2^{(1)} = \frac{\dot{U}_1^{(1)}}{\left(r_1 + \frac{r_2^{(1)}}{s} \right) + j \cdot (x_1 + x_2^{(1)})}, \quad (6)$$

$$\dot{I}_2^{(2)} = \frac{\dot{U}_1^{(2)}}{\left(r_1 + \frac{r_2^{(2)}}{2-s} \right) + j \cdot (x_1 + x_2^{(2)})}, \quad (7)$$

де $\dot{U}_1^{(1)}, \dot{U}_1^{(2)}$ – вектори лінійних напруг прямої та зворотної послідовностей в точці 2; r_l, x_1 – активний та реактивний опори обмоток статора відповідно; $r_2^{(1)}, r_2^{(2)}, x_2^{(1)}, x_2^{(2)}$ – активний та реактивний опори обмоток ротора струмам прямої та зворотної послідовностей відповідно; $\underline{z}^{(1)}, \underline{z}^{(2)}$ – опір двигуна струмам прямої та зворотної послідовностей відповідно; s – ковзання, що залежить від коефіцієнта завантаження двигуна.

Значення $r_2^{(1)}$ і $x_2^{(1)}$ відрізняються від $r_2^{(2)}$ і $x_2^{(2)}$ внаслідок витіснення струму в роторі при робочих ковзаннях $0 < s \leq s_n$ [8].

Підставивши формули (4) – (7) в (2) – (3), а останні в (1), отримаємо залежність $\Delta t_{en1}(\dot{U}_l^{(2)})$:

$$\Delta t_{en1}(\dot{U}_l^{(2)}) = k_{en1} \cdot \Delta P_{en1}(\dot{U}_l^{(2)}) + k_{cm} \cdot \Delta P_{cm} + k_{en2} \cdot \Delta P_{en2}(\dot{U}_l^{(2)}) + k_{mex} \cdot \Delta P_{mex} + k_{\delta} \cdot \Delta P_{\delta}. \quad (8)$$

Прирівнявши праву частину залежності (8) до допустимої температури перевищення над температурою навколишнього повітря, можна знайти як модуль, так і фазу $\dot{U}_{2\text{дон}}$.

Приклад. Визначити допустиме значення $\dot{U}_1^{(2)}$ в точці 2 для АД потужністю 160 кВт ($\Delta P_{cm} = 1573 \text{ Вт}$, $\Delta P_{mex} = 488 \text{ Вт}$, $\Delta P_{\delta} = 860 \text{ Вт}$, клас ізоляції F) при під'єднанні його обмоток до лінійних напруг. Напряга прямої послідовності в точці 2 $\dot{U}_l^{(1)} = 381,05 \cdot e^{j \cdot 30^\circ} \text{ В}$, коефіцієнт завантаження двигуна $\beta = 0,9$.

Температура оточуючого повітря 40° С . Для класу ізоляції F перевищення температури обмотки над температурою навколишнього повітря становить 100° С .

Розв'язування. За формулами, наведеними в [7], отримали наступні значення коефіцієнтів $k_{en1} = 0,013$, $k_{en2} = 1,1 \cdot 10^{-3}$, $k_{cm} = 0,022$, $k_{mex} = 1,1 \cdot 10^{-3}$, $k_{\delta} = 1,1 \cdot 10^{-3}$. Рівняння (8) запишемо в наступному вигляді:

$$0,013 \cdot \Delta P_{en1}(\dot{U}_l^{(2)}) + 0,022 \cdot 1573 + 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta P_{en2}(\dot{U}_l^{(2)}) + 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot 488 + 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot 860 = 100.$$

Із цього рівняння для випадку, коли аргумент $\dot{U}_1^{(2)}$ дорівнює 90° , отримуємо значення напруги зворотної послідовності $U_1^{(2)} = 10,28 \text{ В}$ ($k_{2U} = 2,7\%$).

Дослідження залежності перевищення температури від аргументу $\dot{U}_1^{(2)}$

Побудуємо залежність перевищення температури обмоток АД від аргументу напруги зворотної послідовності в полярних координатах.

З рис. 2 видно, що за різних значень аргументу напруги зворотної послідовності, обмотки двигуна нагріваються неоднаково. Найбільше значення перевищення температури обмоток АД відповідає такому випадку, коли струм в одній із обмоток буде максимальним (аргументи струмів прямої та зворотної послідовностей однакові) [2]:

$$\arg(\dot{I}_1^{(1)}) = \arg(\dot{I}_1^{(2)}). \quad (9)$$

Із виразів (4) – (5), враховуючи (9), впливає :

$$\arg\left(\frac{\dot{U}_1^{(1)}}{\underline{z}^{(1)}}\right) = \arg\left(\frac{\dot{U}_1^{(2)}}{\underline{z}^{(2)}}\right), \quad (10)$$

тобто максимальне перевищення температури обмоток АД отримаємо, якщо різниця аргументів між напругою прямої та зворотної послідовності дорівнює різниці аргументів опорів двигуна струмам прямої та зворотної послідовностей:

$$\arg(\dot{U}_1^{(1)}) - \arg(\dot{U}_1^{(2)}) = \arg(\underline{z}^{(1)}) - \arg(\underline{z}^{(2)}). \quad (11)$$

Варто також зазначити, що значення правої частини виразу (11) змінюється залежно від рівня завантаження двигуна, тобто від ковзання.

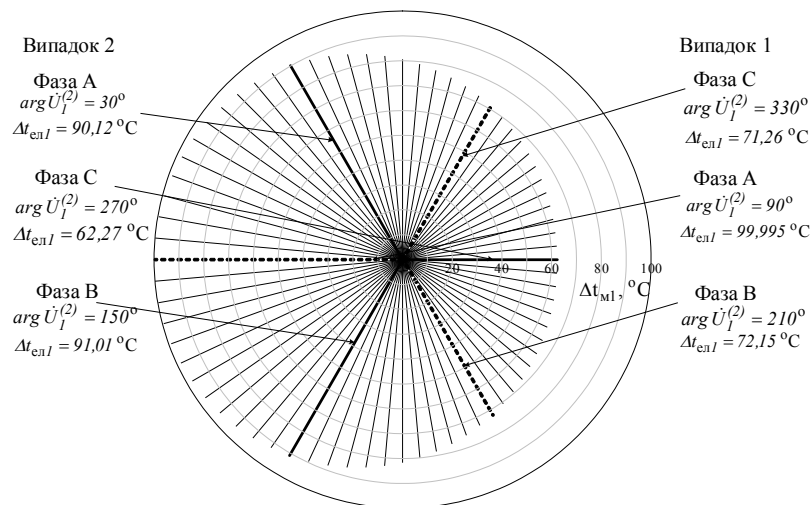


Рис. 2. Залежність перевищення температури обмоток АД від аргументу напруги зворотної послідовності

Для цього прикладу максимальне значення Δt_{en1} в одній із фаз отримуємо, коли аргумент $\dot{U}_1^{(2)}$ на 60° більший аргументу $\dot{U}_1^{(1)}$. Із усіх можливих випадків, зображених на рис. 1, для прикладу виділимо такі:

а) випадок 1: за $\arg \dot{U}_1^{(2)} = 90^\circ$ перевищення температури обмотки фази А – $99,995^\circ \text{ С}$, фази В – $72,15^\circ \text{ С}$, фази С – $71,26^\circ \text{ С}$ над температурою навколишнього повітря.

б) випадок 2: при $\arg \dot{U}_1^{(2)} = 30^\circ$ перевищення температури обмотки фази А – $90,12^\circ \text{ С}$, фази В – $91,01^\circ \text{ С}$, фази С – $62,27^\circ \text{ С}$ над температурою навколишнього повітря.

На прикладі випадку 2 проілюстровано, що для фази В (оскільки вона є найбільш нагрітою) при $U_1^{(2)} = 10,28 \text{ В}$ маємо додатковий запас нагріву. Провівши розрахунки для

$\arg \dot{U}_1^{(2)} = 30^\circ$, отримуємо допустиме значення напруги зворотної послідовності, яке складає $U_1^{(2)} = 17,06 \text{ В}$ ($k_{2U} = 4,48\%$).

Проаналізувавши результати, отримані в прикладі, треба відзначити, що аргумент напруги зворотної послідовності суттєво впливає на значення $\dot{U}_1^{(2)}$, яке визначається із умов допустимого температурного нагріву ізоляції обмоток АД. Для цього числового прикладу $\dot{U}_1^{(2)}$ за різних аргументів змінюється в межах від $10,28 \text{ В}$ ($k_{2U} = 2,7\%$) до $17,06 \text{ В}$ ($k_{2U} = 4,48\%$).

Висновки

1. Однією з умов забезпечення як максимальної ефективності пристроїв, які оптимізують, так і надійної роботи АД, є можливість оперативного визначення $k_{2U \text{ доп}}$ при заданому його завантаженні та температурі оточуючого повітря.

2. Максимальне значення напруги зворотної послідовності можна визначити з умов допустимого температурного нагріву ізоляції обмоток АД методом еквівалентних гріючих втрат.

3. Максимальне перевищення температури обмоток АД отримаємо, якщо різниця аргументів між напругою прямої та зворотної послідовності дорівнює різниці аргументів опорів двигуна струмам прямої та зворотної послідовностей.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Жежеленко И. В. Влияние качества электроэнергии на надежность асинхронных двигателей / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко, А. В. Горпинич // Промэлектрo. – 2004. – № 1. – С. 15 – 21.
2. Гусаров А. А. Влияние качества электрической энергии на тепловое состояние трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором / А. А. Гусаров // Наукові праці ДонНТУ. – 2008. – № 8 (140). – С. 95 – 97.
3. Пинчук О. Г. Оценка теплового состояния асинхронных двигателей в повторно-кратковременных режимах при несимметрии напряжения сети / О. Г. Пинчук // Вісник СевДТУ. – 2008. – Вип. 88. – С. 97 – 103.
4. Качан Ю. Г. Реализация модели асинхронного двигателя для условий некачественного питания / Ю. Г. Качан, А. В. Николаенко, В. В. Кузнецов // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – 2009. – Випуск 3 (56). – С. 150 – 153.
5. Пинчук О. Г. Оценка теплового состояния асинхронного двигателя по данным контроля токов статора при несимметрии питающего напряжения / О. Г. Пинчук, И. П. Кутковой // Наукові праці ДонНТУ. – 2009. – № 9 (158). – С. 190 – 196.
6. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97. – [Чинний з 01.01.99]. – К. : Госстандарт Украины, 1999. – 31 с.
7. Гольдберг О. Д. Проектирование электрических машин / О. Д. Гольдберг, Я. С. Гуринов, И. С. Свириденко; под ред. О. Д. Гольдберга. – М. : Высшая школа, 2001. – 430 с.
8. Токарев Б. Ф. Электрические машины / Б. Ф. Токарев – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 624 с.

Терешкевич Леонід Борисович – к. т. н, доцент, кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, тел.: (0432)-465357, e-mail: tereshkevich_l@mail.ru.

Червінська Тетяна Миколаївна – аспірант, кафедра електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, тел.: (096)-4669377, e-mail: chervinskatm@rambler.ru.
Вінницький національний технічний університет.