

3 ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

3.1 Силові трансформатори

Трансформатори є основним електричним устаткуванням, що забезпечує передачу енергії від електростанції до споживачів і її розподіл. За їхньою допомогою здійснюється підвищення напруги для ліній електропередачі енергосистем, а також багаторазове східчасте зниження напруги до значень, застосовуваних безпосередньо в приймачах. Для компенсації втрат напруги в мережах підвищувальні трансформатори мають на вищій стороні напругу на 10% більшу номінальної напруги мережі, а понижуючі – нижчу напругу на 5-10% вище номінальної напруги мережі. Кожен трансформатор характеризується номінальними даними: потужністю, струмами первинної і вторинної обмоток, утратами холостого ходу ΔP_{XX} , утратами короткого замикання ΔP_k (або втратами в міді ΔP_M), напругою короткого замикання U_k , струмом холостого ходу i_{xx} (або i_0), а також групою з'єднання і видом охолодження.

Напруга короткого замикання трансформатора – це напруга, яку необхідно підвести до однієї з обмоток при замкнутій накоротко іншій, щоб у цій останній протікав номінальний струм. Напруга К.З. у відсотках від номінальної вказується у каталогах і складає 4,5-12%. **Струм холостого ходу** – струм, що при номінальній напрузі встановлюється в одній обмотці при розімкнутій іншій обмотці. Утрати х.х. ΔP_{XX} визначаються струмом i_0 , вираженим у відсотках від номінального струму відповідної обмотки. **Номінальні струми обмоток** трансформатора наводяться в каталогах. Під номінальним навантаженням слід розуміти навантаження, що дорівнює номінальному струму (номінальній потужності), який трансформатор може нести протягом всього терміну служби (20-25 років) при номінальних температурних умовах.

Група з'єднань – кутовий (кратний 30°) зсув векторів між однойменними лінійними напругами обмоток трансформатора.

Початки обмоток двохобмоточного однофазного трансформатора позначають буквами А і а, кінці – Х і х. У трифазних двохобмоточних трансформаторах початки і кінці обмоток позначають відповідно буквами А,В,С,; а,в,с і Х,У,З; х,у,з. Великі букви відносяться до вищої напруги, малі – до обмоток нижчої напруги. Затиски нульової точки при з'єднанні в зірку позначають через О і о. Поняття початку і кінця

обмотки умовно. У трифазних трансформаторах застосовують наступні схеми з'єднань Y/Y, Δ/Δ, Δ/Z, Y/Δ, Δ/Y, Y/Z (Y – з'єднання зіркою, Δ – трикутником, Z – зигзаг-зіркою; у чисельнику зазначені з'єднання обмотки вищої напруги, у знаменнику – нижчої напруги).

Ці схеми утворюють 12 різних груп з'єднань зі зсувом фаз лінійних е.р.с. первинної і вторинної обмоток від 0° до 360° через 30°. Зсув фаз прийнятий за положенням стрілок годинника, вектор е.р.с. обмотки вищої напруги сполучають з великою (хвилинною) стрілкою і завжди встановлюють на цифрі 12, а вектор е.д.с. обмотки нижчої напруги відповідає малій (годинній) стрілці; положення останньої залежить від зсуву фаз е.р.с. обох обмоток. Зсув фаз 0° відповідає 12 годині, таке з'єднання називають групою 12; зсуву фаз 180° відповідає група 6. Схеми Y/Y, Δ/Δ, Δ/Z можуть утворювати парні групи 2,4,6,8,10,12, а схеми Y/Δ, Δ/Y, Y/Z – непарні групи 1,3,5,7,9,11. Групи 12 і 6 є основними парними групами, а групи 11 і 5 – основними непарними групами.

Для визначення параметрів трансформатора складають схему заміщення. При цьому користуються наступними допущеннями:

при зміні навантаження трансформатора в широких межах магнітний потік можна вважати практично постійним і таким, що дорівнює магнітному потокові в режимі Х.Х;

при опиті "нормального" короткого замикання магнітний потік в сердечнику настільки малий, що ним можна знехтувати і прийняти втрати в сталі практично рівними нулю, а втрати в міді (в обмотках) дорівнюють утратам при номінальному навантаженні.

Для трансформатора зірка-зірка з нулем потужністю S_n , напругою первинної обмотки U_{1H} , а вторинної $U_{20(XX)}$, напруги короткого замикання U_k %, потужність К.З. $P_{кз}$, потужність Х.Х. P_{XX} , струм Х.Х. I_{0XX} , коефіцієнт потужності $\cos \varphi_2$, коефіцієнт завантаження β .

Необхідно розрахувати активні й реактивні опори, спадання напруги у вторинній обмотці і побудувати схему заміщення.

Розрахунок починаємо з визначення номінального струму первинної обмотки:

$$I_{1H} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{1H}}. \quad (3.1)$$

Струм Х.Х. дорівнює

$$I_0 = I_0 \cdot I_{1H}. \quad (3.2)$$

Коефіцієнт потужності на Х.Х. дорівнює

$$\cos \phi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_{1H} \cdot I_0}. \quad (3.3)$$

Повний опір обмоток трансформатора

$$z_K = \frac{U_{K\Phi}}{I_{K\Phi}}. \quad (3.4)$$

Активний опір

$$r_K = \frac{P_K}{3I_K^2}. \quad (3.5)$$

Реактивний опір

$$x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2}. \quad (3.6)$$

Опори первинної обмотки відповідно

$$\begin{aligned} r_1 = r_2' &= r_K / 2, \\ x_{\sigma 1} = x_{\sigma 2}' &= x_K / 2. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Опори вторинної обмотки

$$\begin{aligned} r_2 &= r_2' / \kappa^2, \\ x_{\sigma 2} &= x_{\sigma 2}' / \kappa^2. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Опір кола, що намагнічує,

$$z_0 = \frac{U_{H\Phi}}{I_{0\Phi}}, \quad (3.9)$$

$$r_0 = \frac{P_0}{3I_0^2}, \quad (3.10)$$

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}.$$

Для побудови зовнішньої характеристики $U_2 = f(\beta)$ визначаємо втрати напруги у вторинній обмотці:

$$\begin{aligned} \Delta U_2 \% &= \beta(U_a \% \cos \phi_2 + U_p \% \sin \phi_2), \\ U_a \% &= U_K \% \cos \phi_K; \cos \phi_K = r_K / z_K, \\ U_p \% &= \sqrt{(U_K \%)^2 - (U_a \%)^2}. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Напруга на затисках вторинної обмотки трансформатора

$$U_2 = \frac{U_{20}}{100} (100 - \Delta U_2 \%). \quad (3.12)$$

Задаючись різними значеннями коефіцієнта завантаження β , знаходимо U_2 . Для побудови залежності $\eta = f_2(\beta)$ розрахунок η виконуємо за формулою

$$\eta = \frac{\beta S_H \cos \phi_2}{\beta S_H \cos \phi_2 + P_0 + \beta^2 P_K}. \quad (3.13)$$

Усе різноманіття електрифікованого устаткування загального застосування можна розділити на машини-двигуни, машини-знаряддя і транспортні машини. Машини-двигуни – це установки, що перетворюють електричну енергію в механічну роботу. Машини-знаряддя – це машини, що використовують механічну роботу машин-двигунів для виконання технологічних операцій. Транспортні машини служать для переміщення різних вантажів.

3.2 Двигуни

Усі машини використовують електричні двигуни змінного або постійного струму, що розрізняються за потужністю, швидкістю, характером руху, конструктивним виконанням, способом охолодження і захисту від впливу навколишнього середовища, статичними і

динамічними характеристиками і т.н. Електричні двигуни змінного струму є асинхронними і синхронними.

Асинхронним називають двигун змінного струму, в якого швидкість обертання ротора залежить від навантаження. Магнітне поле в асинхронному двигуні створюється змінним струмом обмоток статора і ротора. Швидкість обертання ротора відрізняється від швидкості обертання поля. Асинхронні двигуни за конструктивними ознаками підрозділяються на безколекторні й колекторні. Найбільше поширення як двигуни одержали безколекторні асинхронні двигуни. Основним типом такого двигуна є трифазний двигун двох конструкцій – двигун з короткозамкнутим ротором і двигун з фазною обмоткою ротора. Асинхронні двигуни з фазним ротором мають на роторі обмотку, аналогічну статорній.

Двигун змінного струму, ротор якого обертається з частотою, рівною частоті обертового магнітного поля, що створений обмоткою статора, ввімкненою в електричну мережу, називають синхронним двигуном. Синхронні двигуни випускають з двома модифікаціями роторів. При частоті обертання до 1500 об/хв застосовують явнополюсні ротори, при великих частотах обертання - неявнополюсні.

При підключенні двигунів до живильної мережі, коли потужність двигуна порівнянна з потужністю живильного трансформатора, виникає необхідність в обмеженні пускового струму двигуна, щоб кидки струму не впливали на роботу інших споживачів, заживлених від даного трансформатора. Для цього розраховують і послідовно з двигуном установлюють струмообмежуючий реактор.

У довідниках вказується потужність двигуна, яку можна одержати на валу ротора двигуна, або корисна потужність. Активна потужність двигуна при номінальному навантаженні, споживана з мережі, буде більша за величиною і визначається як

$$P_n = \frac{P}{\eta}, \text{кВт} \quad (3.14)$$

Реактивна потужність двигуна

$$Q_n = P_n \operatorname{tg} \phi, \text{кВАр} \quad (3.15)$$

Повна потужність двигуна

$$S_H = \frac{P}{\eta^* \cos \phi}, \text{кВА}; S_H = \sqrt{P_H^2 + Q_H^2}, \text{кВА}. \quad (3.16)$$

Повний струм, споживаний двигуном з мережі,

$$I = \frac{S_H}{\sqrt{3}U_{Л}}, \text{А}. \quad (3.17)$$

Активна складового струму

$$I_a = I \cos \phi, \text{ А}. \quad (3.18)$$

Реактивна складового струму:

$$I_p = I_a \operatorname{tg} \phi, \text{ А}. \quad (3.19)$$

Пусковий струм двигуна в 5-7 разів перевищує значення номінального струму

$$I_{II} = 5I, \text{ А}. \quad (3.20)$$

Індуктивний опір двигуна в пусковому режимі

$$X_{1\sigma}^D = \frac{U_{\phi}}{I_{II}}, \text{ Ом}. \quad (3.21)$$

Індуктивний опір струмообмежуючого реактора

$$X_p = \frac{(U_{2H} - I_{2H} X_{2\sigma}^T - I_{2H} X_{1\sigma}^D)}{I_{2H}}, \text{ Ом}, \quad (3.22)$$

де $X_{2\sigma}^T$ - реактивний опір вторинної обмотки трансформатора,

I_{2H} - номінальний струм вторинної обмотки трансформатора.

При розрахунку опору струмообмежуючого реактора використано номінальний струм вторинної обмотки трансформатора I_{2H} , але трансформатор при нормальній роботі має інший струм залежно від коефіцієнта навантаження.

3.3 Машини постійного струму

Виконують з незалежним збудженням або самозбудженням. Незалежне збудження в більшості випадків електромагнітне, тобто на полюсах є обмотка збудження, по якій проходить постійний струм від стороннього джерела. У машинах із самозбудженням струм для обмотки збудження надходить з якоря. Можливі три варіанти з'єднання обмотки збудження з обмоткою якоря: рівнобіжне, послідовне, змішане. Тому розрізняють машини постійного струму рівнобіжного, послідовного і змішаного збудження. В останньому випадку в машині є дві обмотки збудження. Можливе також комбіноване збудження - незалежне з рівнобіжним, незалежне з послідовним і т.і.

Розглянемо як відбувається перетворення електричної енергії в механічну роботу.

На провідник, розташований у магнітному полі, при протіканні струму діє сила, напрямком якої визначається за правилом лівої руки, а величина сили за законом Ампера:

$$F = BIL, \quad (3.23)$$

де B - індукція;

L - довжина провідника;

I - сила струму.

Під дією сили провідник рухається і виконує роботу

$$A = Fb = BLIb = BIS = I\Phi. \quad (3.24)$$

Якщо провідник виконати у формі рамки, з'явиться обертаючий момент

$$M = 2FR, \quad (3.25)$$

який поверне рамку в положення, коли площа рамки буде перпендикулярна до силових ліній магнітного поля, $M = 0$. При обертанні буде виконана робота

$$A = M\omega t, \text{ Дж}, \quad (3.26)$$

де ω - кутова швидкість рамки;

t - час.

Якщо в магнітне поле помістити декілька рамок, з'єднаних послідовно, то кожна буде прагнути повернутися перпендикулярно до силових ліній магнітного поля. Повертаючись, рамки перетинають силові лінії і за законом Фарадея ЕРС $E = BLv$, v - лінійна швидкість рамки. Відбувається перетворення електричної енергії зовнішнього джерела за законом Ампера в механічну, яка одночасно, за законом Фарадея, перетворюється в електричну. Цей процес можна подати у вигляді

$$F = BLI - M = FR; E = \frac{LdB}{dt} = BL \frac{dS}{dt} = BLv, \quad (3.27)$$

де F - сила; M - момент обертання; v і ω - лінійна і кутова швидкості; L і R - довжина і радіус рамки.

Сукупність рамок, з'єднаних послідовно, називають обмоткою якоря. ЕРС якоря спрямована за правилом Ленца в протилежному напрямку, тобто зустрічно. Рівняння електричної рівноваги обмотки якоря за законом Кіргофа з урахуванням електричного опору якоря $R_{я}$ має вигляд

$$U_{я} = I_{я} R_{я} + E = I_{я} R_{я} + S\Phi\omega_{я}. \quad (3.28)$$

Помножимо на струм якоря й одержимо рівняння балансу потужності двигуна

$$U_{я} I_{я} = I_{я}^2 R_{я} + S\Phi\omega_{я} I_{я} = I_{я}^2 R_{я} + M\omega_{я}. \quad (3.29)$$

Ліва частина - потужність, підведена від зовнішнього джерела, права - це складові енергії, що підводиться і перетворюється в тепло та механічну роботу обертання.

При живленні від тиристорного перетворювача напруга і струм

$$\begin{aligned} U &= U_0 + \sum U_{v\max} \sin(vm\omega t + \phi_{vm}), \\ I &= I_0 + \sum I_{v\max} \sin(vm\omega t + \phi_{vi}), \end{aligned} \quad (3.30)$$

де U_0 - постійна складова; $U_{v\max}$ - амплітуда n гармоніки; v - порядковий номер гармоніки; m - кількість імпульсів за період напруги мережі; ω - кутова частота; ϕ_n і ϕ_i - кути зсуву.

Для гармонійних складових струму обмотка якоря представляє індуктивний опір:

$$\sum X_v = \sum v m \omega L_{\text{я}}, \quad (3.31)$$

де $L_{\text{я}}$ - індуктивність якоря.

Діюче значення струму і напруги

$$U_{\text{я}} = \sqrt{U_0^2 + \sum U_v^2}; I_{\text{я}} = \sqrt{I_0^2 + \sum I_v^2}. \quad (3.32)$$

Рівняння електричної рівноваги

$$\sqrt{U_0^2 + \sum U_v^2} = R_{\text{я}} \sqrt{I_0^2 + \sum I_v^2} + S \Phi \omega_{\text{я}} + \sum X \sum I_v. \quad (3.33)$$

Помножимо на струм з урахуванням, що гармонійні складові не беруть участь в утворенні обертаючого моменту, а постійна складова не створює спадання напруги на індуктивності обмотки якоря. Одержимо баланс

$$\sqrt{(U_0^2 + \sum U_v^2)(I_0^2 + \sum I_v^2)} = (I_0^2 + \sum I_v^2) R_{\text{я}} + M \omega_{\text{я}} + \sum X_v \sum I_v^2. \quad (3.34)$$

Ліва частина - це повна потужність S , споживана двигуном від перетворювача. Перші два члени правої частини складають відповідно теплову і механічну потужності, а сума – це активна потужність двигуна P . Третя частина - це реактивна потужність Q , що визначається як $Q = S - P$.

Для знаходження коефіцієнта потужності двигуна вважаємо, що активна потужність в основному визначається постійною складовою струму

$$P = R_{\text{я}} I_0^2 + S \Phi \omega_{\text{я}} I_0 = I_0 \sqrt{U_0^2 + \sum U_v^2}, \quad (3.35)$$

тому що

$$R_{\text{я}} \sum I_v^2 \ll R_{\text{я}} I_0^2 + S \Phi \omega_{\text{я}} I_0. \quad (3.36)$$

Тоді коефіцієнт потужності

$$K_n = \frac{P}{S} = \frac{I_0 \sqrt{U_0^2 + \sum U_v^2}}{\sqrt{I_0^2 + \sum I_v^2} \sqrt{U_0^2 + \sum U_v^2}} = \frac{I_0}{\sqrt{I_0^2 + \sum I_v^2}} = \frac{I_0}{I_{\text{я}}}. \quad (3.37)$$

Коефіцієнт потужності можна визначити методом двох амперметрів, який полягає у вимірі окремо постійної складової струму магнітоелектричним амперметром і вимір діючого значення струму з урахуванням гармонійних складових електромагнітним амперметром з подальшим розподілом.

З рівняння балансу виходить, що нагрів двигуна при живленні від тиристорного перетворювача збільшується на величину

$$\frac{I_0^2 + \sum I_v^2}{I_0^2} = \frac{I_{\text{я}}^2}{I_0^2}. \quad (3.38)$$

На цю ж величину зменшується і ККД.

$$\eta_{\text{д}} = \frac{\eta_{\text{н}} I_0}{I_{\text{я}}} = K_n \eta_{\text{н}}, \quad (3.39)$$

$\eta_{\text{н}}$ - номінальний ККД при живленні від акумулятора.

Зменшення ККД пояснюється тим, що обертаючий момент створюється тільки постійною складовою струму, а нагрів – постійною і гармонійною складовими. Тому механічна потужність двигуна повинна бути зменшена на величину коефіцієнта використання $K_{\text{в}} = K_n \eta_{\text{н}} \cdot 100\%$.

Відношення $I_0 / I_{\text{я}}$ визначає коефіцієнт потужності двигуна, зменшення ККД і коефіцієнт використання двигуна $K_{\text{в}}$ за механічною потужністю.