

ВПЛИВ СПОСОБІВ КЕРУВАННЯ ВИПРЯМЛЯЧЕМ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГУНА НА ВСТАНОВЛЕНУ ПОТУЖНІСТЬ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

Для зменшення впливу випрямляча вентильного двигуна (ВД) на мережу й узгодження напруги приводу з напругою живлення може виникнути необхідність в узгоджувальному трансформаторі і пристрої компенсації реактивної потужності [1]. На величину потужності цього устаткування впливає спосіб керування випрямлячем, характер навантаження двигуна і діапазон зміни швидкості.

Регулювання напруги випрямляча може бути симетричним і несиметричним. Відомо декілька способів несиметричного регулювання, серед яких одним з найдоцільніших є почергове [2]. У випадку почергового керування в трифазній мостовій схемі створюється штучний нульовий контур, внаслідок чого тривалість протікання струму по вторинних обмотках трансформатора стає меншою за $2/3$ напівперіоду живлячої напруги. Крім цього, підвищуються також енергетичні показники, зокрема зменшується споживання реактивної потужності та збільшуються коефіцієнти зсуву і потужності.

Симетричне керування групами ключів випрямляча характеризується тим, що кути керування

α_1 і α_2 дорівнюють один одному і змінюються в межах $0 \leq \alpha \leq \pi - \beta_{\min}$. У "першому" почерговому способі $\alpha'_{1\min} = 0$, $\frac{\pi}{6} \leq \alpha'_2 \leq \pi - \beta_{\min}$, у "другому" $-\alpha''_{1\min} = \frac{\pi}{6}$, $\frac{\pi}{6} \leq \alpha''_2 \leq \pi - \beta_{\min}$.

Для механізмів з вентиляторним навантаженням залежність моменту опору від швидкості визначається формулою

$$M_z = M_{\text{emax}} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2. \quad (1)$$

Аналітичний вираз електромагнітного моменту ВД за умови нехтування активним опором має вигляд [2]

$$M = \frac{3}{2} p \frac{U_{m(1)}^2 \cos\left(\beta - \frac{\gamma}{2}\right) \sin\theta}{\omega^2 L_q \cos\left(\beta_0 - \frac{\gamma}{2}\right)}, \quad (2)$$

де $U_{m(1)}$ - амплітудне значення першої гармоніки напруги; $\beta_0 = \beta + \theta$; β_0, β - кути випередження; θ - кут навантаження синхронного двигуна;

$\beta = \gamma + \delta$;

γ - кут комутації; δ - кут запасу; p - число пар полюсів;

L_q - індуктивність двигуна по поперечній осі.

З урахуванням максимального значення моменту [3]

$$M_{\max} = \frac{3}{2} p \frac{U_{m(1)}^2 \cos\left(\beta - \frac{\gamma}{2}\right)}{4\omega r}$$

рівняння (2) запишемо таким чином:

$$M = M_{\max} \frac{4r \sin\theta}{\omega L_q \cos\left(\beta_0 - \frac{\gamma}{2}\right) \cos\left(\beta - \frac{\gamma}{2}\right)}, \quad (3)$$

де r - активний опір двигуна ВД.

Розв'язуючи рівняння (1) і (3), знаходимо

$$\left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 = \frac{4r \sin\theta}{\mu X_q \cos\left(\beta_0 - \frac{\gamma}{2}\right) \cos\left(\beta - \frac{\gamma}{2}\right)} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^4, \quad (4)$$

де $\mu = \frac{M_{\text{emax}}}{M_{\max}}$.

Нехтуючи падінням напруги на ключах і вважаючи, що механічні характеристики ВД є абсолютно жорсткими, отримуємо залежно від способу керування наступні вирази:

$$\begin{aligned} \frac{\omega}{\omega_0} &= v \cos\alpha; & \frac{\omega}{\omega_0} &= 0,5v(1 + \cos\alpha_2'); \\ \frac{\omega}{\omega_0} &= 0,5v \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \cos\alpha_2'' \right), \end{aligned} \quad (5)$$

де $v = \frac{k_{\text{сх.в}} U_T}{k_{\text{сх.в}} E \cos\beta}$; U_T, E - відповідно діюче значення вторинної напруги трансформатора та електрорушійної сили ВД;

$k_{\text{сх.в}} = k_{\text{сх.н}} = 1,35$ - відповідно коефіцієнти схем випрямляча і інвертора.

Розв'язуючи спільно рівняння (4) і (5), визначаємо кути керування:

$$\alpha = \arccos \sqrt{G \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-1}}; \quad \alpha_2' = \arccos \left(2 \sqrt{G \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-1}} - 1 \right);$$

$$\alpha_2'' = \arccos \left(2\sqrt{G \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-1}} - \frac{\sqrt{3}}{2} \right), \quad (6)$$

$$\text{де } G = \frac{4r \sin \theta}{v \mu X_q \cos \left(\beta_0 - \frac{\gamma}{2} \right) \cos \left(\beta - \frac{\gamma}{2} \right)}.$$

Вирази (6) дозволяють знаходити кути керування залежно від швидкості і внутрішніх параметрів ВД з похибкою, яка не перевищує 1...3 %.

Рівняння (1) запишемо для струмів ВД у вигляді

$$I_d = I_{dmax} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2,$$

де I_d - середнє значення струму ВД.

Тоді діюче значення вторинного струму трансформатора I_T залежно від способу керування визначимо таким чином [2]:

$$\begin{aligned} I_T &= I_d \sqrt{\frac{2}{3}} = I_{dmax} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \sqrt{\frac{2}{3}}; \quad I_T' = I_{dmax} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \sqrt{1 - \frac{\alpha_2'}{\pi}}; \\ I_T'' &= I_{dmax} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \sqrt{\frac{\pi - \alpha_{1min}' - \alpha_2''}{\pi}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Перетворювач ВД механізмів з вентиляторним навантаженням зазвичай працює у випрямному режимі, а діапазон регулювання швидкості не перевищує 2:1, тому спільне розв'язання рівнянь (5) і (7) дозволяє отримати вирази для діючого значення вторинного струму трансформатора в такому вигляді:

$$I_T = I_{dmax} F(\alpha); \quad I_T' = I_{dmax} F_I(\alpha_2'); \quad I_T'' = I_{dmax} F_{II}(\alpha_2''), \quad (8)$$

$$\text{де } F(\alpha) = v^2 \cos^2 \alpha \sqrt{\frac{2}{3}}; \quad F_I(\alpha_2') = \frac{v^2}{4} (1 + \cos \alpha_2')^2 \sqrt{1 - \frac{\alpha_2'}{\pi}}; \quad F_{II}(\alpha_2'') = \frac{v^2}{4} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \cos \alpha_2'' \right)^2 \sqrt{\frac{5 - \alpha_2''}{6 - \pi}}.$$

Або, підставляючи у вирази (8) значення α , α_2' і α_2'' з виразів (6), знаходимо:

$$\begin{aligned} I_T &= I_{dmax} F \left(G, \frac{\omega}{\omega_0} \right); \quad I_T' = I_{dmax} F_I \left(G, \frac{\omega}{\omega_0} \right); \\ I_T'' &= I_{dmax} F_{II} \left(G, \frac{\omega}{\omega_0} \right), \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{де } F \left(G, \frac{\omega}{\omega_0} \right) = \sqrt{\frac{2}{3}} v^2 \cos^2 \arccos \sqrt{G \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-1}};$$

$$F_I \left(G, \frac{\omega}{\omega_0} \right) = \frac{v^2}{4} [1 + (2\sqrt{G \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-1}} - 1)]^2 \sqrt{1 - [\arccos(2\sqrt{G \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-1}} - 1)] / \pi};$$

$$F_{II} \left(G, \frac{\omega}{\omega_0} \right) = \frac{v^2}{4} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} + (2\sqrt{G \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-1}} - \frac{\sqrt{3}}{2}) \right]^2 \sqrt{\frac{5}{6} - [\arccos(2\sqrt{G \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-1}} - \frac{\sqrt{3}}{2})] / \pi}.$$

Вирази (8) і (9) мають сенс для кутів

$$0 \leq \alpha \leq \pi - \beta_{min}; \quad \alpha_{1min}' = 0; \quad \frac{\pi}{6} \leq \alpha_2' \leq \frac{2}{3}\pi;$$

$$\alpha_{1min}'' = \frac{\pi}{6}; \quad \frac{\pi}{6} \leq \alpha_2'' \leq \frac{2}{3}\pi. \quad (10)$$

Найбільшому діючому значенню струму I_T , яке визначає розрахункову потужність

трансформатора, відповідає максимум функцій $F_m(\alpha)$, $F_{Im}(\alpha_2')$, $F_{IIIm}(\alpha_2'')$ або $F_m\left(G, \frac{\omega}{\omega_0}\right)$, $F_{Im}\left(G, \frac{\omega}{\omega_0}\right)$, $F_{IIIm}\left(G, \frac{\omega}{\omega_0}\right)$. Причому функції $F(\alpha)$, $F_I(\alpha_2')$ і $F_{II}(\alpha_2'')$ дозволяють визначити величину струму трансформатора залежно від кутів керування, а $F\left(G, \frac{\omega}{\omega_0}\right)$, $F_I\left(G, \frac{\omega}{\omega_0}\right)$, $F_{II}\left(G, \frac{\omega}{\omega_0}\right)$ - від швидкості й внутрішніх параметрів ВД.

З виразів (8) видно, що максимуму функцій $F_m(\alpha)$, $F_{Im}(\alpha_2')$, $F_{IIIm}(\alpha_2'')$ відповідають кути керування $\alpha = 0$ і $\alpha_2' = \alpha_2'' = 30^\circ$. Для реальних параметрів ($\beta_0 = 60^\circ$, $\beta = 40^\circ \dots 45^\circ$, $\gamma = 15^\circ \dots 20^\circ$, $\theta = 15^\circ \dots 20^\circ$, $X_q = 1 \dots 1,2$) за умови розрахункової потужності ВД 3000 кВт маємо $F_m(\alpha) = 0,817$, $F_{Im}(\alpha_2') = 0,711$ і $F_{IIIm}(\alpha_2'') = 0,612$. Потужність узгоджувального трансформатора за симетричного керування складе

$$S_T = \sqrt{3} U_T I_{dmax} [F_m(\alpha) \text{ чи } F_m\left(G, \frac{\omega}{\omega_0}\right)] = 4492 \text{ кВт},$$

що значно перевищує потужності трансформаторів, розрахованих для почергових способів ($S_T' = 3909$ кВА; $S_T'' = 3365$ кВА).

Повну потужність ВД знаходимо на основі інтегральних методів:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + P_c^2},$$

Остаточні вирази для активної потужності і потужності спотворення мають вигляд:

$$P = \sqrt{3} U_T I_{dmax} v^2 \cos^3 \alpha \sqrt{\frac{2}{3}}; \quad P^I = \sqrt{3} U_T I_{dmax} \frac{v^2}{8} (1 + \cos \alpha_2')^3 \sqrt{1 - \frac{\alpha_2'}{\pi}};$$

$$P^{II} = \sqrt{3} U_T I_{dmax} \frac{v^2}{8} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \cos \alpha_2'' \right)^3 \sqrt{\frac{5}{6} - \frac{\alpha_2''}{\pi}}; \quad (11)$$

$$P_c = \sqrt{3} U_T I_{dmax} v^2 \cos^2 \alpha \sqrt{\frac{2}{3} \left(\frac{1}{k_c^2} - 1 \right)}; \quad P_c^I = \sqrt{3} U_T I_{dmax} \frac{v^2}{4\sqrt{2}} (1 + \cos \alpha_2')^{2,5} \sqrt{\left(1 - \frac{\alpha_2'}{\pi} \right) \left(\frac{1}{k_c^2} - 1 \right)};$$

$$P_c^{II} = \sqrt{3} U_T I_{dmax} \frac{v^2}{4\sqrt{2}} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \cos \alpha_2'' \right)^2 \sqrt{\left(\frac{5}{6} - \frac{\alpha_2''}{\pi} \right) \left(\frac{1}{k_c^2} - 1 \right) (1,75 + \sqrt{3} \cos \alpha_2'')}. \quad (12)$$

Споживана з мережі реактивна потужність залежить як від способу мережного управління, так і від діапазону регулювання:

$$Q = \sqrt{3} U_T I_{dmax} \left[F'(\alpha) \text{ або } F'\left(G, \frac{\omega}{\omega_0}\right) \right]; \quad Q^I = \sqrt{3} U_T I_{dmax} \left[F_I'(\alpha_2') \text{ або } F_I'\left(G, \frac{\omega}{\omega_0}\right) \right];$$

$$Q^{II} = \sqrt{3} U_T I_{dmax} \left[F_{II}'(\alpha_2'') \text{ або } F_{II}'\left(G, \frac{\omega}{\omega_0}\right) \right], \quad (13)$$

де $F'(\alpha) = v^2 \cos^2 \alpha \sin \alpha \sqrt{\frac{3}{2}}$;

$$F'\left(G, \frac{\omega}{\omega_0}\right) = v^2 \cos^2 \arccos \sqrt{G\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-1}} \sin^2 \arccos \sqrt{G\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-1}} \sqrt{\frac{2}{3}};$$

$$F_I'(\alpha_2') = \frac{v^2}{8} (1 + \cos \alpha_2')^2 \sin \alpha_2' \sqrt{1 - \frac{\alpha_2'}{\pi}};$$

$$F'_I(G, \frac{\omega}{\omega_0}) = \frac{v^2}{2} G \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-1} \operatorname{sinarccos} \left(2 \sqrt{G \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-1}} - 1 \right) \cdot \sqrt{1 - \left[\operatorname{arccos} \left(2 \sqrt{G \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-1}} - 1 \right) \right]^2} / \pi ;$$

$$F'_s(\alpha_2^{\prime\prime}) = \frac{v^2}{8} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \cos \alpha_2^{\prime\prime} \right)^2 \sin \alpha_2^{\prime\prime} \sqrt{\frac{5}{6} - \frac{\alpha_2^{\prime\prime}}{\pi}} ;$$

$$F''_n(G, \frac{\omega}{\omega_0}) = \frac{v^2}{2} G \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-1} \operatorname{sinarccos} \left(2 \sqrt{G \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-1}} - \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \sqrt{\frac{5}{6} - \left[\operatorname{arccos} \left(2 \sqrt{G \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-1}} - \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right]^2} / \pi .$$

Вирази (11) - (13) мають сенс за дотримання умов (10).

Потужність компенсуючих конденсаторів визначається максимальним значенням реактивної потужності, споживаної системою, якому відповідає максимум функцій $F'_m(\alpha)$, $F'_{im}(\alpha_2^I)$,

$F'_{im}(\alpha_2^{\prime\prime})$, або $F'_m(G, \frac{\omega}{\omega_0})$, $F'_{Im}(G, \frac{\omega}{\omega_0})$, $F'_{Im}(G, \frac{\omega}{\omega_0})$. Для наведеного прикладу на рис.1 зображені

розрахункові криві $F'(\alpha)$, $F'_I(\alpha_2^I)$, $F''_n(\alpha_2^{\prime\prime})$ і реактивної потужності, яку споживає ВД за симетричного і почергових способів керування. З графіків на рис.1 знаходимо потужності статичних конденсаторів:

$$Q_K = 1649 \text{ кВАр}; \quad Q'_K = 1320 \text{ кВАр}; \quad Q''_K = 1000 \text{ кВАр}.$$

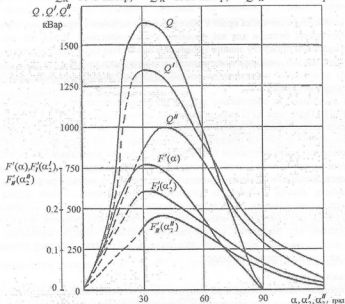


Рис.1. Розрахункові криві $F'(\alpha)$, $F'_I(\alpha_2^I)$, $F''_n(\alpha_2^{\prime\prime})$ і реактивної потужності ВД при симетричному і почерговому способах керування

Висновки

Використання почергових способів керування випрямлячем ВД установок з вентиляторним навантаженням дозволяє знизити величини потужності узгоджувального трансформатора і пристроїв компенсації реактивної потужності. Застосування "другого" почергового способу керування дозволяє досягти найменших значень потужності електрообладнання. "Перший" почерговий спосіб хоч і характеризується вищим значенням встановленої потужності устаткування, проте дозволяє використовувати в одній групі випрямляча некеровані вентилі і спростити систему керування.

Література

1. Закладний О.М., Закладний О.О. Сучасні методи регулювання якості електроенергії// Промислова електроенергетика та електротехніка (Промелектро). - 2007. - №2. - С. 25 -30.
2. Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І. Енергозбереження засобами промислового електроприводу: Навчальний посібник. - К: Кондор, 2005. - 408 с.
3. Закладной А.Н., Передний В.Ю., Гром В.В., Петин И.В. Разработка и исследования математической модели вентиляционного двигателя// Энергетика: економіка, технології, екологія.- 2004. №.2- С. 46-54.