АНАЛІТИЧНІ СПІВВІДНОШЕННЯ МІЖ НАПРУГОЮ ЛАНКИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ, ПОТОКОЗЧЕПЛЕННЯМ ТА КУТОВОЮ ШВИДКІСТЮ В СИСТЕМІ ВЕКТОРНО-КЕРОВАНОГО АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Желінський М.М., асистент
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

Вступ. Системи генерування електричної енергії працюють як з постійною, так і з змінною кутовою швидкістю обертання валу генератора. Векторно-керований асинхронний генератор (АГ), що працює зі змінною кутовою швидкістю є перспективним рішенням для багатьох енергетичних установок: дизель, гідро та вітрових електростанцій, наземних транспортних засобів, аерокосмічних та морських силових систем. Основна перевага генерації енергії зі змінною швидкістю є більш висока енергоефективність первинного рушія та електричного генератора.

Для запуску системи генерування з векторно-керованим АГ необхідно щоб виконувався баланс потужностей в системі, тобто вхідна механічна потужність на валу генератора урівноважується вихідною електричною потужністю в ланці постійного струму, враховуючи ідеальність напівпровідникового перетворювача. Визначення значень вхідної кутової швидкості генератора та генерованої напруги в ланці постійного струму, які для запуску системи є критичними, так як генератор може збуджуватися, коли вал генератора вже обертається, що й обумовлює актуальність дослідження.

Мета роботи. Визначити співвідношення між напругою в ланці постійного струму АГ, кутовою швидкістю та потокозчепленням ротора, які необхідні для запуску системи генерування з векторно-керованим АГ, який працює на автономне навантаження.

Матеріали і результати досліджень. В системі генерування з векторно-керованим АГ, структурна схема якої представлена на рис. 1, для запуску системи необхідна початкова напруга в ланці постійного струму, яка, наприклад, може бути отримана від акумуляторної батареї.

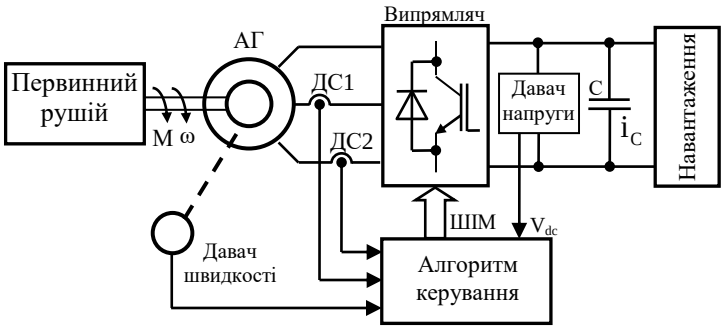

Рисунок 1 – Структура системи генерування

Для забезпечення збудження та можливості генерування вихідної напруги АГ, керуючі напруги, які прикладаються до статорних обмоток, формуються з початкової напруги в ланці постійного струму та залежать від заданих значень струму по осях d та q, а також кутової швидкості обертання валу [1], [2].

Послідовність операцій керування для запуску системи генерування подібна системі векторно-керованого асинхронного електроприводу. В системі електроприводу змінна вхідна напруга перетворюється в постійну за допомогою випрямляча та запасається в ємності ланки постійного струму. Після встановлення номінального значення напруги в ланці постійного струму спочатку виконують збудження АД, а вже потім формують завдання на відпрацювання кутового положення, швидкості чи моменту. У системі генерування з АГ подібна послідовність, але для збудження АГ необхідна початкова напруга в ланці постійного струму, яка буде залежати від того, чи збуджується генератор на швидкості, чи знаходиться в нерухомому стані. Коли ротор нерухомий, генератор не може виконувати перетворення енергії, тому такий стан виключаємо з нормального режиму роботи.

Для збудження АГ, ротор якого обертається з деякою кутовою швидкістю, необхідна початкова величина напруги в ланці постійного струму, з якої будуть сформовані керуючі напруги по осях d та q. Величина початкової напруги в ланці залежить від заданого потокозчеплення та швидкості обертання валу. Розглянемо, чому це так відбувається, для цього запишемо співвідношення між напругою в ланці постійного струму та модулем вихідної напруги статорних обмоток АГ

$$V_{dc} = \sqrt{3}\sqrt{u_d^2 + u_q^2}, \tag{1}$$

де $\left(u_d, u_q\right)^T$ – вектор керуючих напруг статора по осі d та q відповідно.

Компоненти напруги статора по осях d та q після завершення процесів регулювання струмів $\left(\tilde{i}_d, \tilde{i}_q\right) = 0$ та асимптотичного полеорієнтування $\left(\tilde{\psi}_d, \tilde{\psi}_q\right) = 0$ [1], [3], вважаючи, що $i_d^* = \psi^* / L_m$, а $i_q^* = 0$, матимуть вигляд

$$\begin{aligned} u_d &= R_1 \psi^* / L_m, \\ u_q &= L_1 \psi^* \omega p_n / L_m. \end{aligned} \tag{2}$$

Підставляючи (2) в (1), знаходимо залежність значення напруги ланки постійного струму V_{dc} від заданого модуля потокозчеплення ротора ψ^* та швидкості обертання валу генератора ω у вигляді

$$V_{dc} = \sqrt{3}\sqrt{\frac{\psi^{*2}\left(R_1^2 + L_1^2\omega^2\right)}{L_m^2}} = \frac{\sqrt{3}\psi^*}{L_m}\sqrt{R_1^2 + L_1^2\omega^2}. \tag{3}$$

Залежність (3) дозволить визначити з якою мінімальною напругою в ланці постійного струму зможе запуститися система генерування, при якому заданому потокозчепленні та якій кутовій швидкості обертання валу.

Розглянемо значення ψ^*, ω, V_{dc} для досліджуваного генератора з наступними параметрами: номінальна потужність 2.2 кВт, активний опір

обмотки статора R_1=3.5 Ом, активний опір обмотки ротора R_2=2.1 Ом, індуктивність обмотки статора та ротора L_1=L_2=0.2655 Гн, індуктивність намагнічуючого контуру L_m= 0.2582 Гн.

Задавшись лінійною зміною потокозчеплення від 0.02 Вб до номінального значення 0.96 Вб на усталеній швидкості, отримаємо залежність $V_{dc} = f(\psi^*, \omega)$, що зображена на рис. 2.

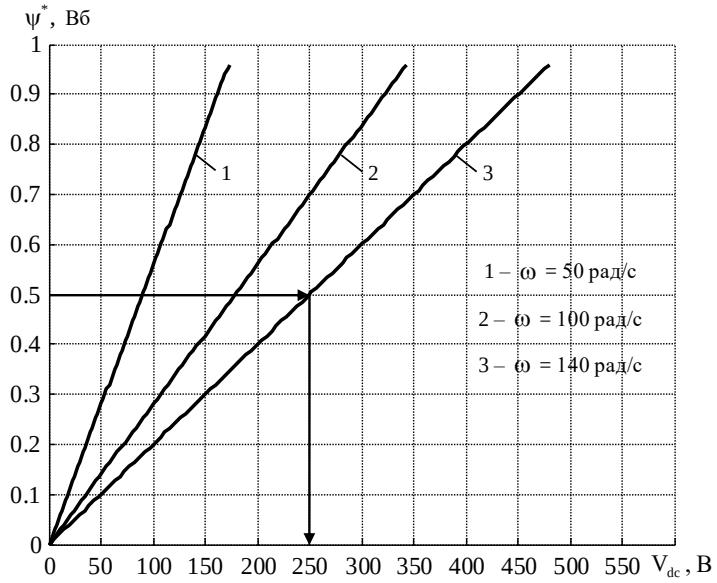

Рисунок 2 – Графік залежності напруги ланки постійного струму V_{dc} від заданого потокозчеплення ψ^* та швидкості обертання валу генератора ω

З рис. 2 встановлюємо, що для роботи системи генерування з заданим потокозчеплення ротора 0.5 Вб на швидкості 140 рад/с необхідно не менше 250 В напруги в ланці постійного струму, враховуючи ідеальність інвертора.

З (3) можна розрахувати, знаючи напругу ланки постійного струму V_{dc} та швидкість ω, аналітичне співвідношення заданого потокозчеплення ротора від напруги ланки постійного струму та кутової швидкості $\psi^* = f\left(V_{dc}, \omega\right)$ у вигляді

$$\psi = \frac{V_{dc} L_m}{\sqrt{3}\sqrt{R_1^2 + L_1^2 \omega^2}}, \tag{4}$$

а також, $\omega = f\left(V_{dc}, \psi^*\right)$, знаючи V_{dc} та ψ^*, у вигляді

$$\omega = \sqrt{\frac{\left(V_{dc} L_m\right)^2 - 3\left(R_1 \psi^*\right)^2}{3\left(L_1 \psi^*\right)^2}}. \tag{5}$$

Ще одним обмеженням є мінімальне значення швидкості обертання генератора, при якій можлива генерація енергії в ланку постійного струму. Визначається це обмеження з балансу потужності між потужністю генератора та потужністю ланки постійного струму [1], [4] у вигляді

$$\left(\frac{L_m\omega\psi^*}{L_2}\right)^2 - 4\left(\alpha\frac{L_m^2}{L_2}+R_1\right)\left(R_1\frac{\psi^{*2}}{L_m^2}+\frac{2}{3}V_{dc}\right)>0. \quad (6)$$

Розв'язавши (6) відносно швидкості, отримаємо

$$\omega > \frac{L_2^2}{L_m^2\psi^{*2}}\sqrt{4\left(\alpha\frac{L_m^2}{L_2}+R_1\right)\left(R_1\frac{\psi^{*2}}{L_m^2}+\frac{2}{3}V_{dc}\right)}. \quad (7)$$

Залежність (7) (рис. 3) показує при яких співвідношеннях швидкості та потокозчеплення ротора можлива генерація енергії в ланку постійного струму.

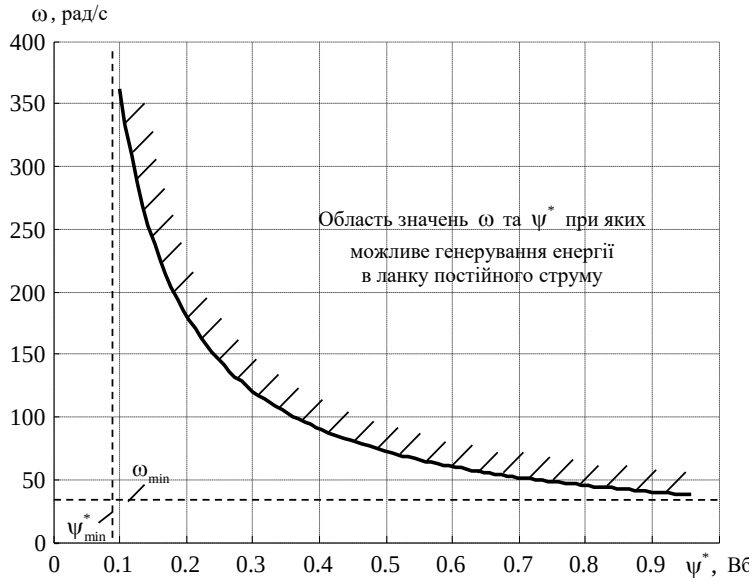

Рисунок 3 – Графік співвідношення швидкості та потокозчеплення ротора, при яких можлива генерація енергії в ланку постійного струму

З рис. 3 видно, що генерація енергії в ланку можлива лише при швидкості обертання ротора, яка обернено пропорційна потокозчепленню ротора, тобто чим більша швидкість, тим менше потокозчеплення ротора потрібне для початку генерування, і навпаки.

Розв'язавши (6) відносно напруги ланки постійного струму, отримаємо

$$V_{dc} > \frac{3}{2}\left(\frac{\left(\frac{L_m\omega\psi^*}{L_2}\right)^2}{4\left(\alpha\frac{L_m^2}{L_2}+R_1\right)} - R_1\frac{\psi^{*2}}{L_m^2}\right). \quad (8)$$

Залежність (8), яка представлена на рис. 4, встановлює обмеження на значення напруги ланки постійного струму від заданих значень потокозчеплення та кутової швидкості обертання ротора.

З рис. 4 видно, що існує критичне значення швидкості при якому встановлюється баланс між вхідною механічною потужністю та електричними втратами АГ, яка для досліджуваного генератора склала 18 рад/с. Тобто, менше цієї швидкості генерація енергії в ланку постійного струму не відбудеться.

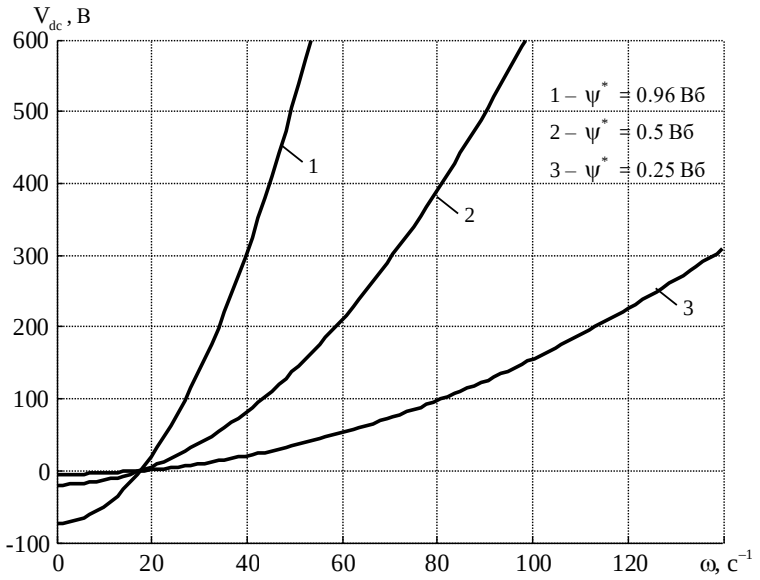

Рисунок 4 – Графік залежності напруги ланки постійного струму від швидкості при різних значеннях потокозчеплення ротора

Висновки. Представлено аналітичні співвідношення між напругою ланки постійного струму, потокозчепленням ротора та кутовою швидкістю в системі генерування з векторно-керованим АГ. За допомогою визначених співвідношень отримують значення початкової напруги в ланці постійного струму, яка необхідна для запуску системи генерування, що працює на автономне навантаження при різній кутовій швидкості обертання валу генератора.

Перелік посилань

1. Peresada S., Kovbasa S., Korol S., Pechenik N., Zhelinskyi N. Indirect field oriented output feedback linearized control of induction generator. 2016 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). 7 June 2016. P. 187-191.

2. Peresada S., Kovbasa S., Korol S., Zhelinskyi N. Feedback linearizing field-oriented control of induction generator: theory and experiments. *Technical Electrodynamics*. 2017. No. 2. P. 48-56.

3. Bozhko S., Peresada S., Kovbasa S., Zhelinskyi M. Robust indirect field oriented control of induction generator. 2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC). 2 November 2016. P. 1-6.

4. Peresada S., Zhelinskyi M., Kovbasa S., Korol S. Indirect field oriented control of the saturated induction generators with linear PI regulators. 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). 17 April 2019. P. 138-143.