

ВТРАТИ ПОТУЖНОСТІ В АСИНХРОННОМУ ГЕНЕРАТОРІ ПОДВІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ

Альо́хін О.О., магістрант, Шаповал І.А., д.т.н., доц.

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

Вступ. Асинхронний генератор подвійного живлення (АГПЖ) популярний серед провідних виробників вітрових турбін (ВТ) для використання у ВТ зі змінною швидкістю [1]. Однією з причин цього є те, що потужність силового напівпровідникового перетворювача в ланці ротора становить лише частину (20–30 %) від загальної потужності [2]. Тому втрати в силовому перетворювачі можна зменшити як порівняти з системою генерування, де перетворювач розрахований на повну потужність. Крім того, вартість перетворювача є нижчою.

Мета роботи. Дослідження електричних втрат в асинхронному генераторі подвійного живлення.

Матеріали дослідження. У статті розглядаються види втрат потужності в системі асинхронного генератора подвійного живлення, модель Парка та еквівалентна схема перетворювача з транзисторами зі зворотними діодами.

Втрати в системі АГПЖ.

В АГПЖ потрібно враховувати втрати в аеродинамічній конверсії, редукторі, генераторі та напівпровідникових приладах. Для коробки передач враховуються втрати холостого ходу та втрати мережі. Для генератора враховуються резистивні втрати статора та ротора, а також втрати намагнічування. Для перетворювача втрати під час перемиканні та втрати на провідність.

Втрати асинхронного генератора.

Загальноприйнятою моделлю для асинхронного генератора (АГ) є модель Парка [5] (або еквівалентна Т-модель). Використовуючи просторові вектори, модель Парка, яка включає втрати в залізі, може бути описана в синхронних координатах:

$$\underline{u}_s = R_s \underline{i}_s + \frac{d\underline{\psi}_s}{dt} + j\omega_1 \underline{\psi}_s, \quad (1)$$

$$\underline{u}_r = R_r \underline{i}_r + \frac{d\underline{\psi}_r}{dt} + j(\omega_1 - \omega_r) \underline{\psi}_r, \quad (2)$$

$$0 = R_m \underline{i}_{m,R} + \frac{d\underline{\psi}_m}{dt} + j\omega_1 \underline{\psi}_m, \quad (3)$$

де \underline{u}_s – напруга статора, \underline{u}_r – напруга ротора, \underline{i}_s – струм статора, \underline{i}_r – струм ротора, $\underline{i}_{m,R}$ – струм магнітного опору, $\underline{\psi}_s$ – потік статора, $\underline{\psi}_r$ – потік ротора, $\underline{\psi}_m$ – потік повітряного зазору, R_s – опір статора, R_r – опір ротора, R_m – синхронне збільшення опору, ω_1 – кутова швидкість, ω_r – кутова швидкість ротора.

Еквівалентну схему АГ в координатах статора представлено на рис. 1.

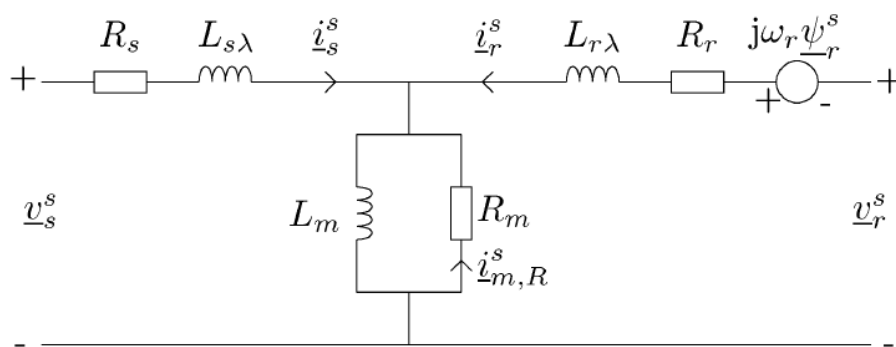


Рисунок 1 – Паркова модель ПГ в координатах статора ($\omega_1=0$)

Оскільки модель описано в синхронних координатах, змінними будуть постійні величини в усталеному стані, а похідні будуть нульовими. Потоки статора, ротора повітряного зазору в (1) – (3) наведено як

$$\underline{\psi}_s = L_s \dot{i}_s + L_m \dot{i}_r + L_m \dot{i}_{m,R} = L_{s\lambda} \dot{i}_s + \underline{\psi}_m, \quad (4)$$

$$\underline{\psi}_r = L_m \dot{i}_s + L_r \dot{i}_r + L_m \dot{i}_{m,R} = L_{r\lambda} \dot{i}_r + \underline{\psi}_m, \quad (5)$$

$$\underline{\psi}_m = L_m \dot{i}_s + L_m \dot{i}_r + L_m \dot{i}_{m,R}, \quad (6)$$

де L_m – взаємна індуктивність, L_s – індуктивність статора, L_r – індуктивність ротора, $L_{s\lambda}$ – індуктивність витoku статора, $L_{r\lambda}$ – індуктивність витoku ротора.

Резистивні втрати АГ становлять:

$$P_{\text{втрати,ПГ}} = 3(R_s |\dot{i}_s|^2 + R_r |\dot{i}_r|^2 + R_m |\dot{i}_{m,R}|^2). \quad (7)$$

З цього можна виразити електромеханічний крутний момент T_e :

$$T_e = 3n_p \text{Im} [\underline{\psi}_m \dot{i}_r^*] = 3n_p \text{Im} [\underline{\psi}_r \dot{i}_s^*], \quad (8)$$

де n_p – кількість пар полюсів. Якщо АГ оснащено контактними кільцями, падінням напруги на контактних кільцях можна знехтувати.

Втрати напівпровідникового перетворювача.

Для роботи АГПЖ, як системи змінної швидкості, необхідно змінна напруга і частота ротора, які створюються за допомогою перетворювача з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). На рис. 2 зображено еквівалентну схему інвертора, де кожен транзистор, від Т1 до Т6, оснащений зворотним діодом.

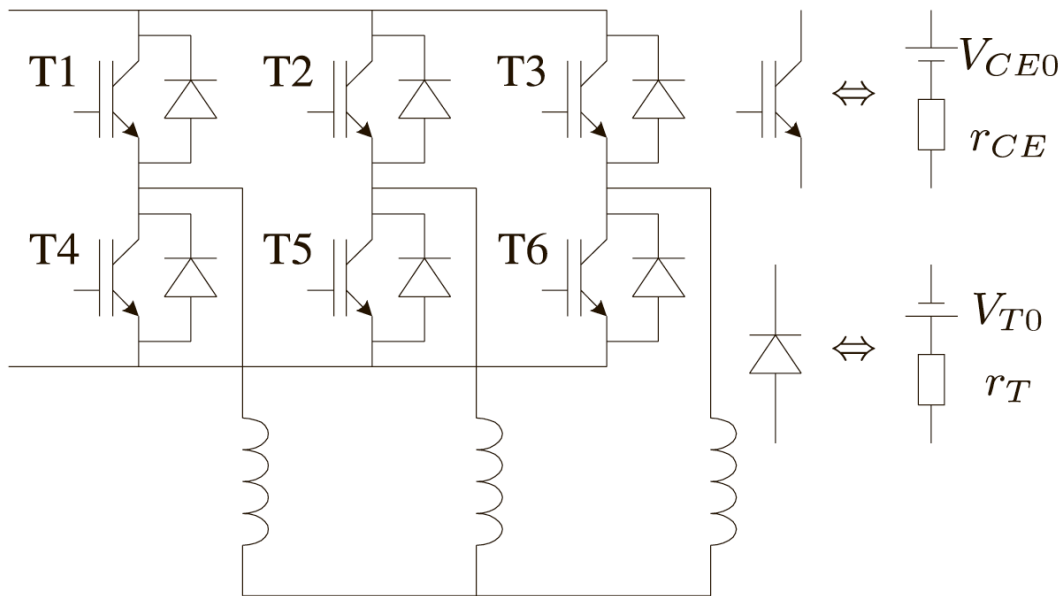


Рисунок 2 – Схема інвертора

Втрати інвертора можна розділити на втрати під час перемикання та втрати на провідність. Втрати на провідність виникають унаслідок струмозалежного падіння напруги на транзисторах та діодах під час їхньої роботи. Падіння напруги на транзисторах та діодах можна промодельовувати як постійні перепади напруги, V_{CE0} та V_{T0} , та послідовний опір, r_{CE} та r_T , див. рис. 2. У цій статті використовується таке наближення: $r = r_{CE} \approx r_T$ та $V = V_{CE0} \approx V_{T0}$. За допомогою такого наближення можна звести втрати провідності транзистора та діода до однієї моделі:

$$P_c = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V I_{rms} + r I_{rms}^2, \quad (9)$$

де I_{rms} – середньоквадратичне значення фазного струму перетворювача.

Втрати транзисторів на перемикання – це втрати під час вмикання та вимикання. Для діода втрати на перемикання в основному складаються із втрат на вимкнення [3], тобто енергії зворотного відновлення. Загальні втрати під час перемикання ключів перетворювача можна розглядати як лінійну функцію середньоквадратичного фазового струму, частоти перемикання та константи перетворювача [4]:

$$P_{sw} = C_{sw} f_{sw} I_{rms}, \quad (10)$$

де C_{sw} – емпірично визначена константа, а f_{sw} – частота перемикання. Оскільки втрати на перемикання є лінійною функцією середньоквадратичного струму, втрати на перемикання можна промодельовувати як постійне падіння напруги, тобто рівняння (9) можна модифікувати, щоб включити втрати на перемикання. Крім того, втрати під час перемикання можна розділити на дві частини, перші

від транзистора та інші від діода. Падіння напруги на транзисторах під час перемикання дістається з енергії вмикання та вимикання, а падіння напруги перемикання для діода дістається з енергії зворотного відновлення.

Загальні втрати інвертора з урахуванням трьох транзисторних плечей можна записати як:

$$P_c = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} (V + V_{sw,d} + V_{sw,t}) I_{rms} + r I_{rms}^2 \quad (11)$$

де V – падіння напруги в IGBT і діоді, r – опір в IGBT та діоді, $V_{sw,d}$, $V_{sw,t}$ – напруги перемикання для IGBT та діода відповідно.

Перетворювач у роторній ланці можна розглядати як два інвертори, з'єднані разом: машинний перетворювач (МП) та мережевий перетворювач (МЖП). Для МП струм через I_{rms} є фазним струмом ротора. Одним зі способів розрахунку I_{rms} для МЖП є використання активної частини струму ротора, скоригувавши співвідношення між напругою машини та напругою мережі. Реактивний струм можна прирівняти до нуля. Отже, тепер можна розрахувати втрати роторного перетворювача як:

$$P_{втрати,перетворювач} = P_{втрати,МЖП} + P_{втрати,МП} \quad (12)$$

Розглянемо залежність опору IGBT та діода від номінального струму, якщо, наприклад, МП має номінальну напругу 1 В і різні номінальні значення струму, тобто 0,3-3,2 А, залежно від падіння напруги; МЖП має номінальну напругу 1 В і номінальний струм 0,3 А. Параметри втрат, використані для цих IGBT, показані на рис. 3 та в таблиці.

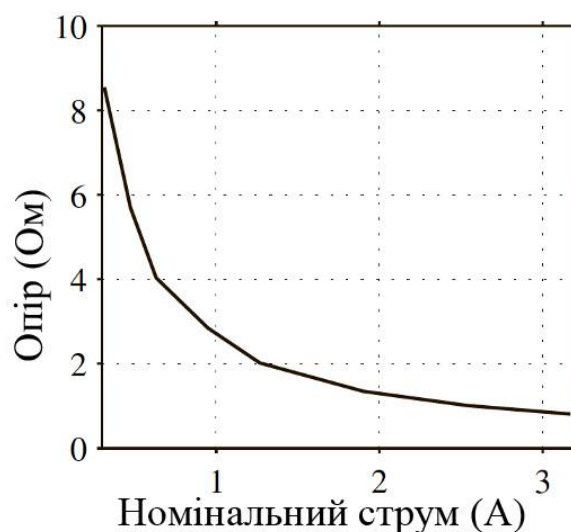


Рисунок 3 – Залежність опору IGBT та діода від номінального струму

Таблиця – Падіння напруги в IGBT та діоді

Падіння напруги	Значення
U	0,0021
U _{sw,t}	0,0072
U _{sw,d}	0,0011

З рис. 3 та таблиці можна помітити, що опір зменшується зі збільшенням номінального струму. Падіння напруги є постійним, незалежно від номінального струму.

Втрати в редукторі.

Один із способів оцінити втрати в редукторі $P_{\text{втрати,КП}}$ це:

$$P_{\text{втрати,КП}} = \eta P_{\text{міншвидкість}} + \xi P_n \frac{\Omega_r}{\Omega_{rn}} \quad (13)$$

де η – константа втрат в сітці шестерень, а ξ – стала тертя.

Загальні втрати системи генерування.

Під час розрахунку втрат для системи будемо враховувати втрати АГ, втрати в редукторі, а також втрати машинного перетворювача та мережевого перетворювача. Загальні втрати системи дістанемо як:

$$P_{\text{втрати}} = P_{\text{втрати,КП}} + P_{\text{втрати,МЖП}} + P_{\text{втрати,МП}} + P_{\text{втрати,ІГ}} \quad (14)$$

Висновки. В статті були розглянуті різні види втрат асинхронного генератора подвійного живлення, а саме втрати в генераторі, перетворювачі та редукторі. Було встановлено, що внаслідок збільшення номінального струму IGBT, можна зменшити втрати самого перетворювача. Також було наведено формулу розрахунку загальних втрат для системи генерування з АГПЖ.

Перелік посилань

1. Hansen LH, Helle L, Blaabjerg F, Ritchie E, Munk-Nielsen S, Bindner H, Sørensen P, Bak-Jensen B. Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines. Technical Report R-1205(EN), Risø National Laboratory, Roskilde, 2001.
2. Xu L, Wei C. Torque and reactive power control of a doubly fed induction machine by position sensorless scheme. IEEE Transactions on Industry Applications 1995; 31: 636–642.
3. Thorborg K. Power Electronics—in Theory and Practice. Studentlitteratur: Lund, 1997.
4. Abrahamsen F. In Control in Power Electronics: Selected Problems, Energy Optimal Control of Induction Motor Drives, Kazmierkowski MP, Krishnan R, Blaabjerg F (eds). Academic Press: San Diego, CA, 2002; 209–224.
5. P. K. Kovacs, *Transient Phenomena in Electrical Machines*, Elsevier, 1984.