

ОГЛЯД СИСТЕМ ГЕНЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН З ВІТРО- ТА ГІДРОТУРБІННИМИ РУШІЯМИ

Іванов М.Д., Філенко О.В., магістранти, Приймак Б.І., к.т.н., доц.

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

Вступ. У відновлювальній енергетиці, яка в останні десятиліття стрімко розвивається, значне місце займають вітряні та водяні електростанції. Основою цих електростанцій є електричні машини різних типів. На сьогодні відома велика кількість літературних джерел, присвячених системам генерації електроенергії на базі електричних машин з рушіями у вигляді вітряних та водяних турбін. Але залишається актуальним проведення аналітичного огляду сучасного стану цих систем. Варіант такого огляду наведено у даній статті.

Мета роботи – огляд існуючих на сьогодні систем генерування електричної енергії на основі електричних машин, що приводяться в рух вітряними і водяними турбінами, та виявлення тенденцій розвитку цих систем.

Матеріали і результати досліджень. У багатьох системах електромашинного генерування електроенергії вихідний вал первинного рушія механічно з'єднаний з генератором. В деяких випадках швидкість первинного рушія стабілізують системою керування. Якщо система генерування працює при змінній швидкості обертання, це збільшує коефіцієнт використання первинного джерела, тому робота на змінній швидкості є більш перспективною.

Як і електричні двигуни, генератори також можна розділити на різні типи. Деякі з них не користуються популярністю і рідко використовуються через свої характеристики або масо-габаритні показники. До таких відносяться генератори постійного струму. На рис. 1 наведена класифікація генераторів.

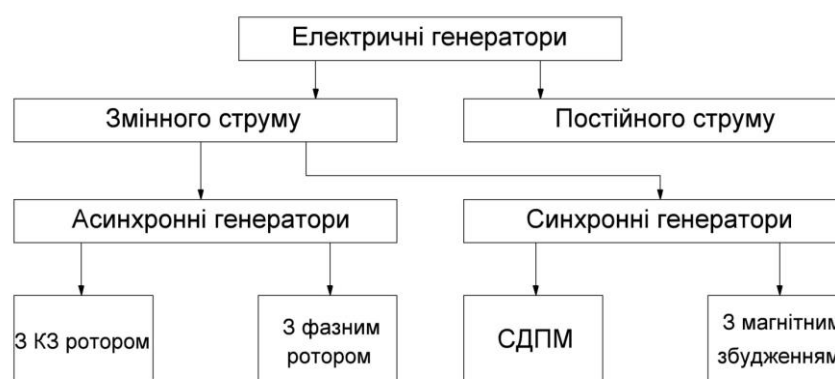


Рисунок 1 – Класифікація електричних генераторів

У вітроенергетиці та гідроенергетиці широко використовуються синхронні генератори зі збудженням від постійних магнітів (СГПМ), або асинхронні генератори на основі машин подвійного живлення чи з короткозамкненим ротором. В усіх цих типів є свої переваги та недоліки.

Зараз більшість генераторів працюють вкупі з інверторами та системами автоматичного керування параметрами виробленої електричної енергії. Завдяки такому поєднанню стає можливим підключення генератора до мережі електропостачання навіть якщо швидкість привідного валу не постійна [1, 2].

Синхронний генератор з постійними магнітами. Даний тип генераторів потребує від первинного рушія постійної швидкості обертання. Для цього використовується спеціальний зовнішній пристрій синхронізації а саме регулятор швидкості первинного рушія [3, 4].

Якщо неможливо підтримувати швидкість первинного рушія постійною, тоді можна синхронний генератор підключити до мережі з використанням двох перетворювачів – інвертора та випрямляча [3]. Схема такої системи зображена на рис. 2. Такі системи можуть працювати як на автономне навантаження, так і на електромережу.

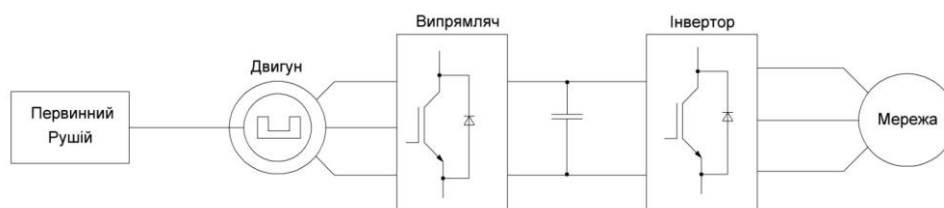


Рисунок 2 – Система генерування з СГПМ при роботі зі змінною швидкістю

Система, зображена на рис. 2, є найбільш перспективною. Дана система широко розповсюджена у вітроенергетиці. Але у такої системи є також і ряд певних недоліків. Один з них це вартість цієї системи у порівнянні з вартістю системи на базі асинхронного генератора.

Асинхронні генератори. Такі системи генерування можна розділити на два типи, ці типи розрізняються за електричними машинами на базі яких будується система генерування електроенергії. А саме – машини подвійного живлення (МПЖ) та асинхронні машини з короткозамкненим ротором [5-10].

Спочатку розглянемо систему генерування на базі машини з подвійним живленням схема якої зображена на рис. 3. Така схема дозволяє працювати генератору зі змінною швидкістю привідного механізму. Для цього у коло ротора включається два перетворювачі з потужністю 20-30% від номінальної потужності генератора [8, 11].

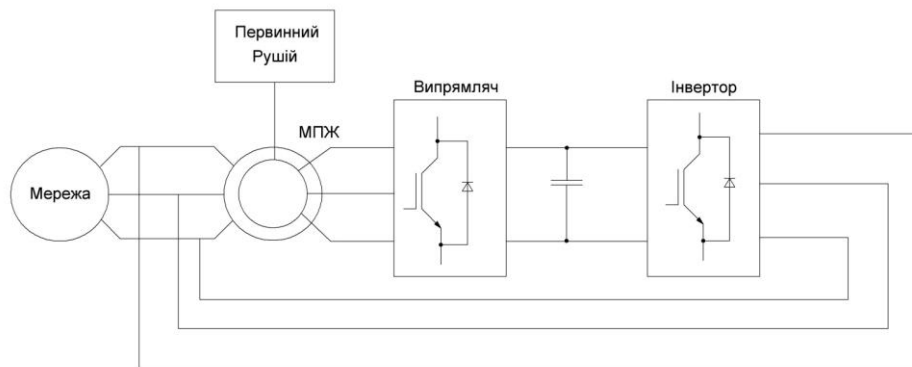


Рисунок 3 – Схема підключення машини подвійного живлення для генерування енергії

Така система має декілька значних переваг, серед яких:

- менша вартість ніж система на базі синхронної машини;
- можливість керувати повною потужністю за рахунок перетворювача;
- керування моментом;
- керування реактивною потужністю;
- струми ротора та статора мають синусоїдальну форму;
- струми ротора та статора мають малу кількість гармонік;
- регулювання коефіцієнту потужності роторного кола приводить до того що на виході системи генерування енергія має активний характер.

Проте у генератора на базі машини подвійного живлення є наступні недоліки:

- обмежений діапазон зміни кутової швидкості;
- наявність контактних кілець на фазному роторі.

Система генерування на основі асинхронного генератора (АГ) з короткозамкненим (КЗ) ротором. Це найпростіша система генерування. У такій системі статор генератора підключений до мережі, як показано на рис. 4, а.

Такі системи працюють за принципом нерегульованого асинхронного електроприводу в генераторному режимі [12-14]. Цей режим роботи забезпечується за рахунок того, що кутову швидкість первинного рушія необхідно встановити більшою за синхронну швидкість. У вітряних електростанціях регулювання швидкості первинного рушія здійснюють за рахунок системи керування, яка повертає лопаті вітряка на певний потрібний кут, що зменшує або збільшує швидкість обертання [15]. Використання таких систем є найдешевшим способом, що є перевагою, але така система не дозволяє забезпечити якісне керування процесом генерації.

У випадку, коли генератор працює автономно, використовується ємнісне збудження. Схема такої системи зображена на рис. 4, б. Налаштування значення ємності конденсаторів залежно від струму навантаження дозволяє підтримувати частоту і напругу на виході генератора [16, 18]. Проте, використовуючи таку систему, важко забезпечити необхідну точність регулювання напруги та частоти в статиці і динаміці [18-24].

У публікації [25] автори розглядають характеристики і режими асинхронного генератора при глибокому насиченні сталі. А саме, встановлюють закономірності, які дозволяють визначити великий приріст втрат у сталі асинхронної машини при її глибокому насиченні і зміни експлуатаційних характеристик машини.

Щоб отримати максимальну ефективність від первинного рушія та генератора можна використовувати систему на основі полеорієнтованого АГ, яка базується на принципах векторного керування [26] Схема системи векторного керування АГ представлена на рис. 5.

Для того, щоб система могла працювати на електромережу використовуються два перетворювачі. Схема такої системи зображена на рис. 6.

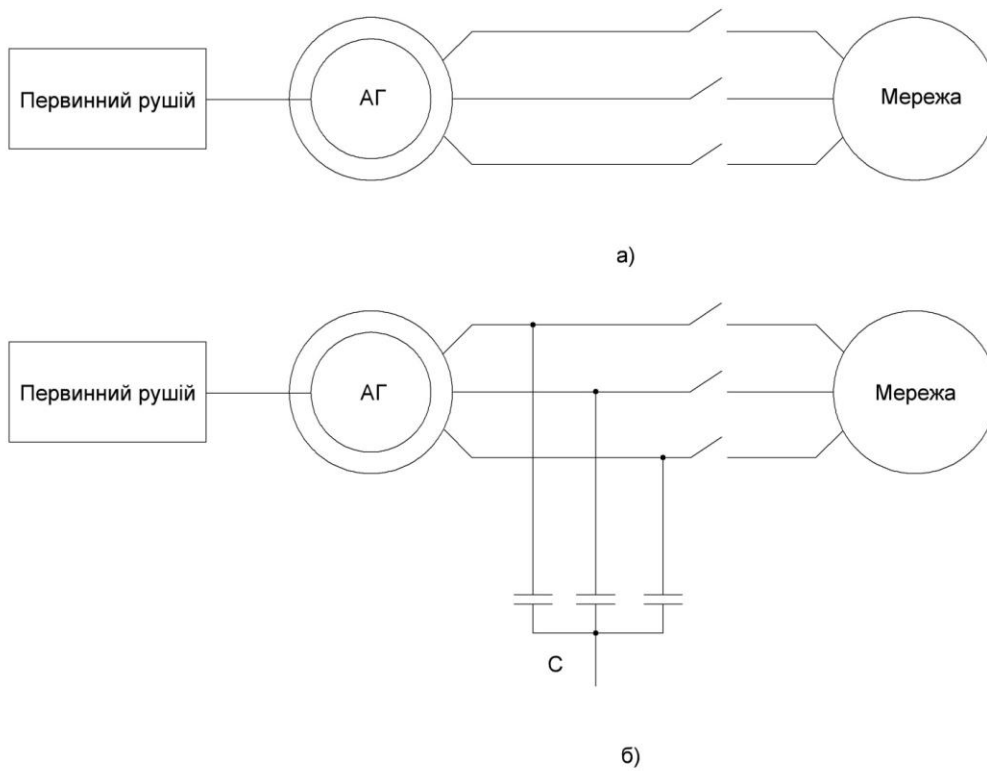


Рисунок 4 – Система генерування на основі АГ з КЗ ротором за постійної швидкості обертання: а) підключення до мережі; б) автономне навантаження.

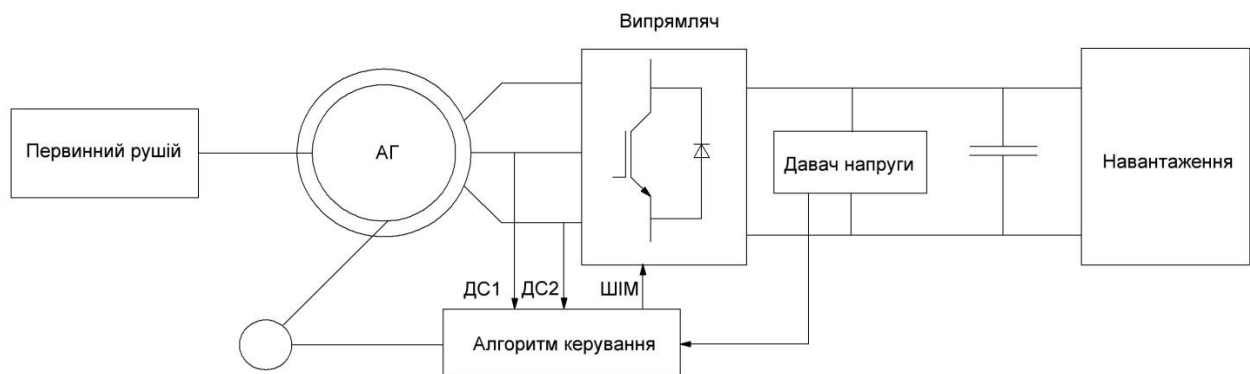


Рисунок 5 – Структура системи векторного керування АГ з КЗ ротором

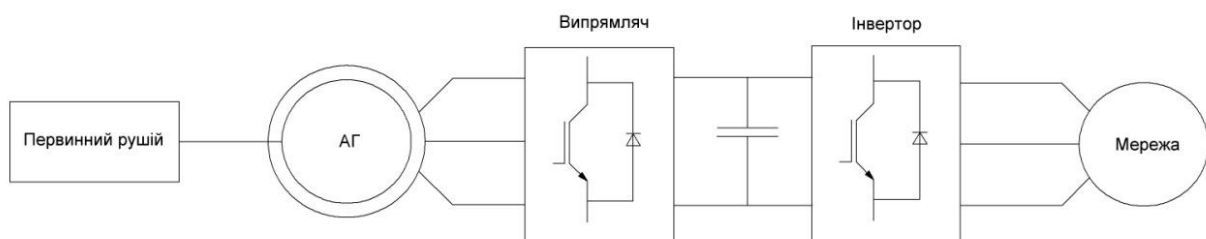


Рисунок 6 – Системи генерування з АГ при подвійному перетворенні електроенергії

Проблеми керування полеорієнтованим асинхронним генератором почали досліджувати ще багато років тому. В працях [24-27] автори розглядають методи керування в системі генерування які базуються на полеорієнтуванні за векторами потокочеплення ротора та статора. Робиться висновок, що керувати асинхронним генератором можна за схожим методами до тих, які застосовуються для керування асинхронним двигуном.

Структура системи генерування подібна до системи керування швидкістю у векторно-керованому електроприводі з тією відмінністю, що ПІ-регулятор швидкості замінюється на ПІ-регулятор напруги у ланці постійного струму. Ця подібність впливає зі спрощеного розгляду динаміки напруги ланки постійного струму. Контур напруги нелінійний та розраховується з балансу потужності системи асинхронного генератора та перетворювача.

У проектуванні таких систем є типовий підхід, який ґрунтується на лінеаризації контуру напруги та на таких методах керування, як частотне керування, підпорядковане керування, керування на базі функцій Ляпунова.

Висновки. Оглянувши різні типи систем електромашинного генерування електричної енергії, бачимо, що на сьогодні у цій сфері домінують безконтактні електричні машини із системами автоматичного керування параметрами виробленої електроенергії. При цьому, поряд із широким використанням синхронних генераторів з постійними магнітами та асинхронних машин подвійного живлення, зростає популярність систем генерування на базі векторно-керованих асинхронних генераторів з короткозамкненим ротором. Результати побудови та дослідження такої системи незабаром будуть представлені в магістерській дисертації на кафедрі АЕМС-ЕП.

Перелік посилань

1. Gorbe P., Magyar A., Hangos K. M. Reduction of power losses with smart grids fueled with renewable sources and applying EV batteries. *Journal of Cleaner Production*. 2012. Vol. 34. P. 125-137.
2. Vandoorn T. L., Meersman B., Degroote L., Renders B., Vandeveldel L. A control strategy for islanded microgrids with DC-link voltage control. *IEEE Transactions on power delivery*. 2011. Vol. 26, No. 2. P. 703-713.
3. Babu N. R., Arulmozhivarman P. Wind energy conversion systems-a technical review. *Journal of engineering science and technology*. 2013. Vol. 8, No. 4. P. 493-507.
4. Wu B., Lang Y., Zargari N., Kouro S. Power conversion and control of wind energy systems. Wiley-IEEE Press, 2011. 480 p.
5. Simoes M. G., Farret F. A. Modeling and analysis with induction generators. Boca Raton: CRC Press, 2015. 468 p.
6. Carunaiselvane C., Chelliah T. R. Present trends and future prospects of asynchronous machines in renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 74. P. 1028-1041.
7. Feehally T., Apsley J. M. The doubly fed induction machine as an aero generator. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2015. Vol. 51, No. 4. P. 3462-3471.
8. Pena R., Cardenas R., Asher G. Overview of control systems for the operation of DFIGs in wind energy applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2013. Vol. 60, No. 7. P. 2776-2798.
9. Egea-Alvarez A., Junyent-Ferre A., Bergas-Jane J., Bianchi F. D., Gomis-Bellmunt O. Control of a wind turbine cluster based on squirrel cage induction generators connected to a single

- VSC power converter. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2014. Vol. 61. P. 523-530.
10. Ajami A., Armaghan M. Fixed speed wind farm operation improvement using current-source converter based UPQC. *Energy Conversion and Management*. 2012. Vol. 58. P. 10-18.
 11. Peresada S., Blagodir V., Zhelinskyi M. Output feedback control of stand-alone doubly-fed induction generator. 2016 2nd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). 7 Jun. 2016. P. 162-167.
 12. Wei M., Chen Z. Fast control strategy for stabilising fixed-speed induction-generator-based wind turbines in an islanded distributed system. *IET Renewable Power Generation*. 2013. Vol. 7, No. 2. P. 144-162.
 13. Alnasir Z., Kazerani M. An analytical literature review of stand-alone wind energy conversion systems from generator viewpoint. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 28. P. 597-615.
 14. Dangeam S. A design of single phase induction generator for waterfall-hydro turbine. *Energy Procedia*. 2013. Vol. 34. P. 130-141
 15. Nababan S., Muljadi E., Blaabjerg F. An overview of power topologies for micro-hydro turbines. 2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). 25 Jun. 2012. P. 737-744.
 16. Murthy S. S., Malik O. P., Tandon A. K. Analysis of self-excited induction generators. *Transmission and Distribution IEE Proceedings C - Generation*. 1982. Vol. 129, No. 6. P. 260-265.
 17. Пушкар М. В. Самозбудження та регулювання в автономних системах генерації з асинхронними генераторами: автореф. дис. канд. техн. наук / Інституту електродинаміки НАН України. Київ, 2016. 20 с.
 18. Jayashri R., Kumudini Devi R. P. Effect of tuned unified power flow controller to mitigate the rotor speed instability of fixed-speed wind turbines. *Renewable Energy*. 2009. Vol. 34, No. 3. P. 591-596.
 19. Dusonchet L., Telaretti E. Effects of electrical and mechanical parameters on the transient voltage stability of a fixed speed wind turbine. *Electric Power Systems Research*. 2011. Vol. 81, No. 7. P. 1308-1316.
 20. Martins M., Perdana A., Ledesma P., Agneholm E., Carlson O. Validation of fixed speed wind turbine dynamic models with measured data. *Renewable Energy*. 2007. Vol. 32, No. 8. P. 1301-1316.
 21. EL-Helw H. M., Tennakoon S. B. Evaluation of the suitability of a fixed speed wind turbine for large scale wind farms considering the new UK grid code. *Renewable Energy*. 2008. Vol. 33, No. 1. P. 1-12.
 22. Rahimi M., Parniani M. Dynamic behavior and transient stability analysis of fixed speed wind turbines. *Renewable Energy*. 2009. Vol. 34, No. 12. P. 2613-2624.
 23. Haque M. H. Evaluation of power flow solutions with fixed speed wind turbine generating systems. *Energy Conversion and Management*. 2014. Vol. 79. P. 511-518.
 24. Saheb-Koussa D., Haddadi M., Belhamel M., Nouredine S. Modeling and simulation of wind generator with fixed speed wind turbine under matlab-simulink. *Energy Procedia*. 2012. Vol. 18. P. 701-708.
 25. Родькин Д. И., Ченчевой В. В. Характеристики и режимы асинхронного генератора при глубоком насыщении стали. *Электротехнические и компьютерные системы*. 2014. Вып. 15(91). С. 271-276.
 26. Lyra R. O. C., Silva S. R., Cortizo P. C. Direct and indirect flux control of an isolated induction generator. Proceedings of 1995 International Conference on Power Electronics and Drive Systems. PEDS 95. 1995. Vol. 1. P. 140-145.
 27. Seyoum D., Rahman M. F., Grantham C. Terminal voltage control of a wind turbine driven isolated induction generator using stator oriented field control. Eighteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC03). 9 Feb. 2003. Vol. 2. P. 846-852.