

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Дорохов Олександр Володимирович

УДК 621.313.17

**ЗНИЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ПЕРЕВАНТАЖЕНЬ З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ
НАДІЙНОСТІ АСИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ ВІТРОЕЛЕКТРОАГРЕГАТІВ, ЯКІ
ПРАЦЮЮТЬ ПАРАЛЕЛЬНО З МЕРЕЖЕЮ**

Спеціальність 05.09.01 – електричні машини і апарати

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2005

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі електротехніки в Харківській національній академії міського господарства Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Фінкельштейн Володимир Борисович,
Харківська національна академія міського господарства,
професор кафедри електротехніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Олейніков Олександр Михайлович,
Севастопольській національній технічній університет,
завідувач кафедри судових та промислових електромеханічних систем;
кандидат технічних наук, доцент
Петренко Микола Якович,
Національний технічний університет "Харківський
політехнічний інститут",
доцент кафедри електричних машин.

Провідна установа: Одеській національній політехнічний університет Міністерства освіти і науки України.

Захист відбудеться "12" травня 2005 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут".

за адресою:

61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Автореферат розісланий " ____ " _____ 2005 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Марков В.С.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. За планами розвитку вітроелектростанцій (ВЕС) в Україні до 2010 р. загальна потужність ВЕС повинна досягти 1990 МВт, а до 2030 р. – 16000 МВт, при цьому щорічне виробництво електроенергії на базі ВЕС планується вивести на рівень 20...35% від загальної кількості електроенергії, що виробляється в країні.

Загальна кількість вітроелектроагрегатів (ВЕА) українського виробництва потужністю 110 кВт перевищує 200 одиниць. З установлених ВЕА переважна більшість - це ліцензійні агрегати USW56-100 виробництва Уінденерго з асинхронними генераторами (АГ) виробництва ДП ХЕМЗ (м. Харків) і ВО «ЮЖЕЛЕКТРОМАШ» (м. Нова Каховка).

У процесі експлуатації ВЕА спостерігаються такі явища:

- при підмиканні ВЕА до мережі мали місце поломки лопатей;
- спостерігалися несанкціоновані спрацьовування апаратів захисту, що виключають можливість запуску ВЕА в роботу;
- відбувалося руйнування підшипників генераторів;
- спостерігалася невідповідність потужності генерованої ВЕА в енергосистему при заданій середній швидкості вітру паспортній потужності ВЕА;
- мав місце вихід з ладу генераторів ВЕА внаслідок зниження опору ізоляції обмотки генератора.

Зазначені обставини зумовили нагальну потребу в глибокому вивченні причин, що викликають вказані явища, й у розробці наукових і технічних рішень, що дозволяють їх виключити. Одним зі шляхів зниження механічних напружень у вузлах і деталях ВЕА, а також забезпечення стійкості ВЕС і енергосистеми у цілому є демпфування ударних струмів і моментів АГ. Оптимізація їхніх параметрів і узгодження останніх із коливаннями швидкості вітру конкретного району дозволяє правильно розраховувати генеровану ВЕА потужність.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до науково-дослідних робіт кафедри електротехніки за темою "Розробка перспективних зразків електричних машин і апаратів і створення їх теорії" у межах проекту "Наукові основи удосконалення виробництва, передачі та використання електроенергії" (план НДР Міністерства освіти України №37 від 13.02.1997 р.).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка методики розрахунку ударних струмів і моментів, а також засобів і методів їхнього зниження і розробка рекомендацій з підвищення надійності АГ ВЕА.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- проаналізувати причини відмов ВЕА на ВЕС і дати рекомендації щодо їхнього усунення;

- розробити методику розрахунку ударних струмів і моментів у перехідному процесі, що виникає при підмиканні АГ до мережі, як із демпфуючими опорами у колі статора, так і без них;

- провести дослідження впливу початкової фази напруги при неодноточасному підмиканні фаз АГ до мережі на динаміку протікання перехідних процесів в АГ;

- розробити апарати, схеми вмикання АГ ВЕА, що знижують (демпфують) або повністю виключають ударні навантаження в перехідних режимах;

- встановити взаємозв'язок між гармонійними складовими швидкості вітру і генерованою ВЕА потужністю;

Об'єкт дослідження – перехідні і експлуатаційні процеси у ВЕА як системи, що включає до себе вітрогенератор, АГ, пускові і захисні пристрої.

Предмет дослідження – ударні струми і моменти АГ при паралельній роботі з мережею, параметри генераторів з урахуванням гармонік швидкості вітру, стійкість АГ ВЕА до кліматичних впливів.

Методи дослідження - моделювання перехідних процесів в АГ ВЕА на ЕОМ, шляхом аналітичного рішення систем диференціальних рівнянь, за різними схемами демпфування ударних струмів і моментів та коливаннями середньої швидкості вітру. Експериментальне дослідження режимів роботи АГ ВЕА.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. На базі системи диференціальних рівнянь асинхронної машини (АМ) з урахуванням активного опору обмотки статора і додаткових активних опорів, уведених у коло статора, вперше одержані аналітичні залежності ударних струмів і моментів від її параметрів.

2. У результаті розв'язання системи диференціальних рівнянь уперше одержані аналітичні залежності, які дозволяють описати почергове підмикання фаз генератора до мережі у заданий момент часу при заданих початкових фазах напруги. Встановлена найбільш раціональна послідовність підмикання фаз обмотки АГ до мережі, визначені оптимальні початкові фази напруги.

3. У систему диференціальних рівнянь уперше введено функцію, що встановлює безпосередній зв'язок між гармонійними складовими швидкості вітру і моментом на валу генератора, що дозволяє вірно розраховувати генеровану потужність залежно від умов на конкретній площадці установки ВЕА і знижує ймовірність помилки при виборі вітроплощадки для будівництва ВЕС.

4. Теоретично встановлено вплив коливань швидкості вітру на потужність, що

віддається вітротурбіною. Визначена розбіжність між потужністю, яку віддає вутротурбіна, і потужністю, що встановлена заводом виготовлювачем.

Практичне значення одержаних результатів:

- одержані аналітичні залежності дозволяють зробити розрахунок ударних струмів і моментів, що необхідно для проектування механічної частини ВЕА й обґрунтованого вибору параметрів пускозахисної апаратури;

- розроблені методики розрахунку ударних струмів і моментів, а також генерованої ВЕА потужності, подані в універсальній математичній системі MathCAD 7.0 PRO у вигляді програмних блоків;

- розроблений апарат для підмикання АГ до мережі дозволяє приблизно в два рази знизити ударний динамічний момент і в півтора рази ударний струм. Це, у свою чергу, забезпечує можливість виконання механічної частини ВЕА з меншим запасом міцності і відповідно зі зменшеними габаритами і масою.

- запропонована методика розрахунку кривої потужності ВЕА при осцилюючому моменті на валу, зумовленому коливаннями швидкості вітру в районі його установки;

- розроблено рекомендації з вибору АГ для ВЕА;

- результати дисертаційної роботи впроваджені на ДП "ХЕМЗ" (м. Харків), що підтверджує акт впровадження. Програми розрахунків, отримані в ході дисертаційної роботи, подані у вигляді готових програмних блоків і готові до використання при проектуванні і розрахунку перехідних струмів і моментів при запуску в експлуатацію будь-яких АГ ВЕА. Запропонований у роботі спосіб зниження ударних струмів і моментів за рахунок уведення в коло статора активних опорів використаний на встановлених в Україні нових ВЕА типу Т600-48 потужністю 600 кВт.

Особистий внесок здобувача. Всі положення дисертації отримані здобувачем особисто. Серед них:

1) методика розрахунку ударних струмів і моментів, що виникають при одночасному підмиканні фаз АГ на паралельну роботу з мережею, як із демпфуючими опорами, у колі статора, так і без них;

- методика розрахунку ударних струмів і моментів при неодноразовому підмиканні фаз АГ до мережі. При розрахунку враховано вплив початкової фази напруги на характер протікання перехідного процесу;

- обґрунтування взаємозв'язку між гармонійними складовими швидкості вітру і потужністю, що віддається вітротурбіною;

2) розроблено і реалізовано на ЕОМ таких програм:

- програму розрахунку перехідних процесів в АГ при одночасному підмиканні фаз

обмотки до мережі, як із демпфуючими опорами, у колі статора, так і без них;

- програму розрахунку ударних струмів і моментів при неодноразовому підмиканні фаз АГ до мережі;

- програму розрахунку генерованої АГ ВЕА потужності залежно від коливань середньої швидкості вітру;

3) запропоновано і розроблено пристрій, що знижує ударні струми і момент АГ. Виготовлено лабораторні макети і проведено експериментальні дослідження пристрою, що знижує ударні струми і момент АГ.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на ХХІХ Науково-технічній конференції викладачів, аспірантів і співробітників Харківської національної академії міського господарства (ХНАМГ) і засіданнях кафедри електротехніки ХНАМГ у 1998-2000 роках. На міжнародних симпозиумах "Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів" SIEMA', проведених у м.Харкові в 2002р. і 2003 р.

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 6 статей, із яких 4 надруковано у спеціалізованих наукових журналах, 2 у збірнику наукових праць, отримано 1 патент України на винахід.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів та 7 додатків. Повний обсяг дисертації 233 сторінки, 36 ілюстрацій до тексту, 3 ілюстрації на 2 сторінках; 6 таблиць до тексту; 7 додатків на 110 сторінках; 133 найменувань використаних літературних джерел на 11 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі висвітлено актуальність теми дисертації, показано зв'язок роботи з науковими темами, сформульовано основні задачі дослідження, зазначено наукову новизну дисертації та її практичне значення. Висвітлено особистий внесок здобувача у друкованих працях зі співавторами, апробацію роботи, структуру дисертації.

У першому розділі на прикладі Донузлавської ВЕС розглянуто режими й умови роботи АГ ВЕА. Вони є типовими для будь-яких інших генераторів, призначених для експлуатації на ВЕС. Проведено порівняльний аналіз існуючих методів розрахунку перехідних процесів в асинхронних машинах і демпфування ударних струмів і ударного динамічного моменту. Показана необхідність удосконалення інженерних методик, потрібних для проєктантів ВЕА, і необхідних для розрахунку перехідних струмів і моментів, а також генерованої ВЕА потужності при заданих коливаннях швидкості вітру.

У другому розділі розглянуто розв'язання системи диференціальних рівнянь, що

описують перехідний процес при одночасному підмиканні трьох фаз обмотки АГ до мережі.

У результаті розв'язання цієї системи були одержані аналітичні залежності зміни у часі струмів (рис.1,2) і ударного динамічного моменту (рис.3) генератора при перехідному процесі.

Система диференційних рівнянь, що описує перехідні процеси в АМ з короткозамкненим ротором, у комплексній обертовій системі координат має такий вигляд:

$$\begin{cases} i_s R_s + \frac{d\psi_s}{dt} + j\omega_K \psi_s = u_s, \\ i_r R_r + \frac{d\psi_r}{dt} + j(\omega_K - \omega)\psi_r = 0, \end{cases} \quad (1)$$

$$M = 1,5p \operatorname{Im}(\psi_s^* i_s);$$

За допомогою відомих формул (2) система (1) записується відносно потокозчеплень. При відомих потокозчепленнях струми статора і ротора розраховуються за допомогою (2).

$$i_s = (\psi_s - k_r \psi_r) / L'_s, \quad i_r = (\psi_r - k_s \psi_s) / L'_r; \quad (2)$$

де i_s , i_r – відповідно значення струмів статора і ротора; R_s – сума активного опору обмотки статора і додаткових опорів, R_r – активний опір обмотки ротора; ψ_s , ψ_r – відповідно потокозчеплення статора і ротора; L'_s – зведена до статора результуюча індуктивність нерухомої АМ без активних опорів; L'_r – зведена до ротору результуюча індуктивність нерухомої АМ без активних опорів при замкненій обмотці статора й розімкнутій обмотці ротора;

Розв'язання системи може бути подане у вигляді:

$$\psi_s = \psi_{sy} + C_1 \lambda_1 \exp(\alpha_1 t) + C_2 \lambda_2 \exp(\alpha_2 t), \quad \psi_r = \psi_{ry} + C_1 \exp(\alpha_1 t) + C_2 \exp(\alpha_2 t), \quad (3)$$

де ψ_{sy} і ψ_{ry} – відповідно сталі складові потокозчеплень статора і ротора; α_1 і α_2 – корені характеристичного рівняння; C_1 , C_2 – коефіцієнти, які визначаються з початкових умов; λ_1 , λ_2 – корені рівнянь однорідної системи.

$$\psi_{sy} = -j \left[u_s \exp(j\alpha_{us}) - i_0 R_s \exp \left[j \left(\alpha_{us} - \arctg \frac{\omega L'_s}{R_s} \right) \right] \right] / \omega; \quad (4)$$

$$\psi_{ry} = \psi_{sy} k_s. \quad (5)$$

У цьому ж розділі встановлено, що зменшити струми (рис.2) і момент (рис.3, крива 2) при перехідному процесі можна при вмиканні на час пуску послідовно з кожною фазною обмоткою статора активних опорів із значенням, що у 3...3,5 рази перевищують значення активного опору фазних обмоток. У цьому випадку досягається зниження ударних струмів у 1,5 рази і моменту у 2,5 рази відносно вмикання АГ до паралельної роботи з мережею без

демпфуючих опорів у колі статора (рис.1, рис.3, крива 1).

Рис.1. Зміни у часі струмів у фазах генератора при перехідному процесі без демпфуючих опорів. Крива 1 - фаза А, крива 2 - фаза В, крива 3 - фаза С.

Рис.2. Зміни у часі струмів у фазах генератора при перехідному процесі з демпфіруючими опорами в колі статора. Крива 1 - фаза А, крива 2 - фаза В, крива 3 - фаза С.

Рис.3. Зміни у часі кратності моменту генератора при перехідному процесі, крива 1 - без демпфуючих опорів у колі статора, крива 2 - з демпфіруючими опорами.

Встановлено, що шунтування демпфуючого опору необхідно робити тільки після згасання аперіодичних складових струмів, що виключає сплески струмів і моментів, більших за ті, що були при увімкненому опорі. Час загасання аперіодичних складових струмів для різних типів АГ складає від 0,2 до 1,5 сек.

У третьому розділі розглядається неодночасне підмикання фаз АГ до мережі.

Для нормальної роботи енергосистеми необхідно, щоб пускові струми устаткування, що підмикаються до неї, були меншими за граничні значення. Для обмеження пускових струмів застосовуються відомі пристрої "плавного пуску" на основі зустрічно-паралельного з'єднання тиристорів у кожній фазі. При цьому для електроустаткування струми якого достатньо знизити удвічі, а стосовно ВЕА, якщо достатньо знизити удвічі і пусковий момент, запропоновано пристрій (рис.6) на двох симісторах. Цей пристрій здійснює неодночасне підмикання фаз АГ до мережі.

При неодночасному підмиканні фаз обмотки генератора до мережі перевантаження за струмом і моментом суттєво знижуються. Підмикання двох фаз генератора до мережі слід здійснювати у момент часу, що відповідає амплітудному значенню лінійної напруги, а третю фазу підмикати при амплітудному значенні фазної напруги із запізнюванням у 9-12 періодів (0,2-0,24 сек.). При цьому досягається зниження ударних струмів у 5,3 рази і моменту у 1,5 рази (рис.4....рис.9.) Коли підмикання АГ здійснюється за невідповідністю зазначеним вимогам, кратність моменту сягатиме 4, а кратність струмів сягатиме 15.

Рис.4 Оптимальне двофазне вмикання з підмиканням фази С (суцільна лінія) після дев'ятого періоду

Рис.5. Неоптимальне двофазне вмикання з підмиканням фази С (суцільна лінія) після дев'ятого періоду

Рис.6 Оптимальне двофазне вмикання з підмиканням фази С (суцільна лінія) після першого періоду

Рис.7 Неоптимальне двофазне вмикання з підмиканням фази С (суцільна лінія) після першого періоду

Рис.8. Зміни у часі кратності моменту при оптимальному підмиканні двох фаз і оптимальному підмиканні третьої фази після дев'ятого періоду

Рис.9. Зміни у часі кратності моменту при неоптимальному підмиканні двох фаз і оптимальному підмиканні третьої фази після дев'ятого періоду

При двофазному підмиканні у нерухомій системі координат в осях α , β процеси в АМ описуються системою диференційних рівнянь :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{s\beta} R_s + \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} = \sqrt{3} U_m \sin(\omega t + \alpha_u); \\ i_{r\beta} R_r + \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} - \omega_r \psi_{r\alpha} = 0; \\ i_{r\alpha} R_r + \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} + \omega_r \psi_{r\beta} = 0, \end{array} \right. \quad (6),$$

де $\psi_{s\beta}, \psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}$, - потокозчеплення статора по осі β і ротора по осях α і β відповідно; $i_{s\beta}$, $i_{r\alpha}$, $i_{r\beta}$ - струми статора по осі β і ротора по осях α і β відповідно; α_u – початкова фаза лінійної напруги; $\omega = 2\pi f$ – кутова частота мережі; ω_r – швидкість обертання ротора в електричних радіанах, оскільки розглядається підмикання при синхронній швидкості обертання ротора, то $\omega_r = \omega$; t – час, сек.

Оскільки розглядається двофазне вмикання, то всі опори й індуктивності мають бути подвоєні щодо відповідних фазних величин.

Система диференційних рівнянь при нульових початкових умовах розв'язується наступним способом:

зображення потокозчеплення статора по осі β можна записати у вигляді:

$$\Psi_{s\beta} = \frac{\Delta_{s\beta}}{\Delta} = U_m \frac{p^3 b_1 + p^2 b_2 + p b_3 + b_4}{(p^3 + p^2 a_1 + p a_2 + a_3) \cdot (p^2 + \omega^2)}, \quad (7)$$

$$\text{де } a_1 = \frac{R_s}{L'_s} + \frac{R_r}{L'_r} + \frac{R_r}{L_r}, \quad a_2 = \frac{R_s R_r}{L'_s L'_r} (1 - k_s k_r) + \frac{R_r}{L_r} \left(\frac{R_r}{L'_r} + \frac{R_s}{L'_s} \right) + \omega_r^2,$$

$$a_3 = \frac{R_s R_r^2}{L'_s L'_r L_r} (1 - k_s k_r) + \omega_r^2 \frac{R_s}{L'_s}, \quad b_1 = \sin(\alpha_u),$$

$$b_2 = \left(\frac{R_r}{L_r} + \frac{R_r}{L'_r} \right) \sin(\alpha_u) + \omega \cos(\alpha_u), \quad b_3 = \left(\frac{R_r}{L_r} + \frac{R_r}{L'_r} \right) \omega \cos(\alpha_u) + \left(\frac{R_r^2}{L_r L'_r} + \omega_r^2 \right) \sin(\alpha_u),$$

$$b_4 = \left(\frac{R_r^2}{L_r L'_r} + \omega_r^2 \right) \omega \cos(\alpha_u).$$

Для переходу від зображення до оригіналу поточозчеплення необхідно дробово-раціональну частину (7) розкласти на доданки. Попередньо треба прирівнюючи знаменник до нуля, знайти корені отриманого рівняння. Перший співмножник являє собою кубічне рівняння, його корені $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, можна визначити за формулами Кардано, $\lambda_{4,5} = \pm j\omega$.

За відомих $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ і λ_5 (7) можна подати у вигляді:

$$\Psi_{s\beta} = U_m \left(\frac{A_1}{p - \lambda_1} + \frac{A_2}{p - \lambda_2} + \frac{A_3}{p - \lambda_3} + \frac{A_4}{p - \lambda_4} + \frac{A_5}{p - \lambda_5} \right), \quad (8)$$

$$\text{де } A_k = \frac{\lambda_k^3 b_1 + \lambda_k^2 b_2 + \lambda_k b_3 + b_4}{5\lambda_k^4 + 4a_1 \lambda_k^3 + 3(a_2 + \omega^2) \lambda_k^2 + 2\lambda_k (a_3 + a_1 \omega^2) + a_2 \omega^2}.$$

Перехід від зображення до оригіналу можна здійснити за допомогою теореми розкладання, відповідно до якої:

$$\Psi_{sb} = U_m \sum_{k=1}^5 A_k \exp(\lambda_k t). \quad (9)$$

Функція поточозчеплення статора (9) буде дійсною за наявності комплексних коренів λ і коефіцієнтів A :

$$\psi_{r\beta} = \left(\frac{d\psi_{s\beta}}{dt} + \frac{R_s}{L'_s} \psi_{s\beta} - \sqrt{3} U_m \sin(\omega t + \alpha_u) \right) / \left(k_r \frac{R_s}{L'_s} \right). \quad (10)$$

Підставляючи (9) у (10), одержимо:

$$\psi_{r\beta} = \frac{U_m}{k_r \frac{R_s}{L'_s}} \left[\left(\sum_{k=1}^5 A_k \left(\lambda_k + \frac{R_s}{L'_s} \right) \exp(\lambda_k t) \right) - \sin(\omega t + \alpha_u) \right]. \quad (11)$$

Вираз для потокозчеплення $\psi_{r\alpha}$:

$$\psi_{r\alpha} = -\omega_r \exp(-(R_r/L_r)t) \int \psi_{r\beta} \exp((R_r/L_r)t) dt \quad (12)$$

Підставляючи потокозчеплення $\psi_{r\beta}$ (11) у вираз для потокозчеплення $\psi_{r\alpha}$ (12), після інтегрування одержимо:

$$\psi_{r\alpha} = -\frac{\omega_r U_m}{k_r \frac{R_s}{L'_s}} \left[\left(\sum_{k=1}^5 A_k \left(\frac{\lambda_k + \frac{R_s}{L'_s}}{\lambda_k + \frac{R_r}{L_r}} \right) \exp(\lambda_k t) \right) + \frac{1}{\left(\frac{R_r}{L_r} \right)^2 + \omega^2} \left(\omega \cos(\omega t + \alpha_u) - \frac{R_r}{L_r} \sin(\omega t + \alpha_u) \right) \right] \quad (13)$$

Після обчислення потокозчеплень ψ_{sb} , ψ_{rb} і $\psi_{r\alpha}$ (9,11,13) стає можливим визначення струмів:

$$i_{s\beta} = \frac{\psi_{s\beta} - k_r \psi_{r\beta}}{L'_s}; \quad i_{r\beta} = \frac{\psi_{r\beta} - k_s \psi_{s\beta}}{L'_r}; \quad i_{r\alpha} = \frac{\psi_{r\alpha}}{L_r}.$$

За відомими струмами і потокозчепленням момент генератора може бути подано у вигляді:

$$M_T = p(\psi_{r\beta} i_{r\alpha} - \psi_{r\alpha} i_{r\beta}). \quad (14)$$

При двофазному вмиканні струм у фазі А не протікає і її потокозчеплення у цьому випадку повністю визначається частиною складової потоку ротора по осі α , що проникає в

статор. Одночасно вона є дійсною складовою потоку статора у момент підмикання третьої фази.

Отже, початкові умови для комплексів поточозчеплень статора і ротора, можна подати у вигляді:

$$\Psi_s(t_e) = \frac{k_r \Psi_{r\alpha} + j\Psi_{s\beta}}{2}, \quad \Psi_r(t_e) = \frac{\Psi_{r\alpha} + j\Psi_{r\beta}}{2}, \quad (15)$$

де t_e - час вмикання третьої фази, що відлічується з моменту двофазного підмикання.

Для розрахунку двофазного і трифазного вмикання було складено програму і розраховано струми й ударні динамічні моменти при підмиканні двох фаз генератора до мережі з наступним підмиканням з деяким запізненням третьої фази. Початковими умовами для трифазного вмикання були значення поточозчеплень двофазного вмикання у момент підмикання третьої фази генератора до мережі.

У запропонованому пристрої (рис.10) досягається забезпечення вмикання силового кола при проходженні синусоїдної напруги через амплітудне значення при відхиленні напруги мережі живлення від номінального значення (наприклад 380 В), що відповідають нормативам. Також досягається практична сталість фази.

напруги, при якій відбувається вмикання і за рахунок цього забезпечується працездатність пристрою при зниженні напруги мережі живлення і нормальна його робота при підвищеній нарузі. Крім того, забезпечується необхідне запізнювання на кілька періодів при підмиканні третьої фази.

Рис.10. Схема пристрою для обмеження ударних струмів і моментів при підмиканні машин змінного струму до мережі

Вказане досягнуто завдяки тому, що як узгоджувальні трансформатори застосовано піктрансформатори, підімкнені до керуючих електродів малопотужних тиристорів, і розділяючи діоди. Керуючий електрод першого силового оптронного симістора приєднано анодом безпосередньо до катода першого малопотужного тиристора, а керуючий електрод другого силового оптронного симістора приєднано анодом безпосередньо до катода другого малопотужного тиристора, і катодами керуючі електроди силових оптронних симісторів приєднані до затиску джерела постійного струму з нульовим потенціалом.

Піктрансформатор $T3$ підібраний таким чином, щоб амплітудне значення піку напруги за мінімально можливої напруги мережі дорівнювало керуючій нарузі, що вмикає тиристор $VS4$. При розкіді величини керуючої напруги тиристорів схема налагоджується опорами $R3, R1$

під конкретний тиристор. Фаза імпульсу піктрансформатора відповідає 90° синусоїди живильної лінійної напруги, за рахунок чого вмикання тиристора $VS4$ відбудеться у точці, що виключає виникнення аперіодичної складової струму. При максимально можливій напрузі мережі живлення відхилення фази вмикання від 90° не перевищить 1° , бо ширина імпульсу при малому навантаженні піктрансформатора складає 2° .

Амплітуда імпульсу піктрансформатора при відхиленні напруги мережі живлення на 10% повинна на 3-5% перевищувати керуючу напругу вмикання малопотужного тиристора. Тоді схема працюватиме і при зниженні номінальної напруги. Для забезпечення запізнювання при підмиканні третьої фази генератора до мережі ємність конденсатора C та індуктивність дроселя L вибираються таким чином, щоб час вмикання реле $K2$ складав 10-12 періодів (0,2-0,24 сек.) за частотою мережі.

Рис.11 Пряме вмикання (без пристрою)

Рис.12 Вмикання за допомогою пристрою

Принцип дії пристрою такий:

1) до натискання кнопки $SA1$ тиристор $VS4$ закритий, бо відсутні керуючі імпульси, а тиристор $VS3$ закритий через відсутність анодного потенціалу, а отже, відсутні сигнали на керуючих електродах силових симісторів $VS1, VS2$ і машина змінного струму G відключена від мережі;

2) після натискання кнопки $SA1$ відкриється тиристор $VS4$ при амплітудному значенні лінійної напруги і буде подана керуюча напруга на керуючий електрод оптронного симістора $VS1$, що також відкриється і підключить до мережі фази A і B обмотки машини змінного струму G саме у той момент, коли лінійна напруга U_{AB} буде дорівнювати амплітудному значенню і саме цим виключається поява аперіодичної складової струму;

3) при вмиканні тиристора $VS4$ на тиристорі $VS3$ з'являється анодний потенціал і коли фазна напруга фази C досягне амплітудного значення імпульс піктрансформатора $T2$, поданий на керуючий електрод тиристора $VS3$, відкриє останні. У результаті цього на керуючому електроді оптронного симістора $VS2$ з'явиться напруга, він відкриється і підмикне фазу C до мережі саме у той момент, коли напруга цієї фази буде дорівнювати амплітудному значенню. Це виключає виникнення аперіодичної складової струму.

4) для відключення машини змінного струму від мережі необхідно натиснути кнопку $SA2$, що приведе до зникнення анодного потенціалу тиристорів $VS4, VS3$ і їхньому закриванню. Одночасно зникає керуюча напруга на оптронних симісторах $VS1, VS2$ і вони закриваються.

Оскільки закривання симісторів $VS1, VS2$ відбувається при проходженні струму через нульове значення, то це виключає виникнення комутаційних перенапруг і збільшує термін служби обмотки.

З осцилограм (рис.11, рис.12) видно, що при підмиканні фаз генератора до мережі за допомогою пристрою (рис.10) величина струму зменшується у 2 рази від величини струму при прямому підмиканні фаз генератора до мережі (рис.11).

У четвертому розділі розглянуто вплив коливань швидкості вітру на потужність, генеровану ВЕА. Виконано аналіз особливостей режиму роботи АГ у складі ВЕА.

У комплексній площині, у системі координат, що обертається з довільною кутовою швидкістю ω_k , вид системи рівнянь (1) при зміні швидкості не змінюється, але оскільки у цьому випадку кутова швидкість не є постійною, то система стає нелінійною. Момент вітротурбіни записується у вигляді:

$$M_T = \pi R^3 \frac{\rho V^2}{2i_p p} C_M(Z); \quad (16)$$

де C_M – коефіцієнт моменту, що є функцією коефіцієнта швидкохідності вітроколеса $Z = \omega_T R / V$; V – швидкість вітру в м/сек; R – радіус вітротурбіни, м; ρ – щільність повітря (за нормальних умов становить $1,23 \text{ кг/м}^3$); ω_T – кутова швидкість вітротурбіни, рад/сек; i_p – передаточне відношення трансмісії; ω – кутова швидкість обертання ротора в електричних радіанах.

Рівняння моментів записується у вигляді:

$$M_{ГЭ} + M_T \eta_M = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (17)$$

де $M_{ГЭ}$ – електромагнітний момент генератора; η_M – коефіцієнт корисної дії механічної передатної ланки ВЕА (головний вал, трансмісія, привідний вал, підшипники і вентилятор генератора); J – момент інерції обертючих мас, зведений до валу генератора.

Кутова швидкість обертання вітротурбіни може бути представлена через кутову швидкість ротора генератора:

$$\omega_T = \omega / \left[i_p p \right]. \quad (18)$$

З урахуванням цього третє рівняння системи (1) набуде вигляд (19). У цьому випадку інтегрування системи виконується методом Рунге – Кутта.

$$\frac{d\omega}{dt} = \left[1,5 \frac{k_r}{L_s} \operatorname{Im}(\psi_r^* \psi_s) + \pi R^3 \frac{\rho V^2}{2i_p p} C_M \left(\frac{\omega R}{i_p p V} \right) \cdot \eta_M \right] / J. \quad (19)$$

На підставі даних метеостанції за характером коливань у місці установки ВЕА швидкість вітру за певний період часу можна представити гармонійним рядом:

$$V = \sum_{i=0}^n \left(C_i \cos(\omega_i t) + W_i \sin(\omega_i t) \right), \quad (20)$$

де C_i і W_i – амплітуди косінусоїдної і синусоїдної складових i -ї гармоніки швидкості вітру відповідно; ω_i – кутова частота i -ї гармоніки (функція $CM(Z)$ визначається при аеродинамічних розрахунках вітротурбіни).

$$M_H = (P_2 * 10^3) / \omega_c \quad (21)$$

Оскільки швидкість вітру фактично постійно змінюється, то АГ ВЕА увесь час працює у перехідних режимах.

На підставі розв'язання перших двох рівнянь системи (1) та рівняння (19) було отримано криві залежностей (рис.13) генерованої потужності ВЕА, для середньої швидкості вітру V з гармонічними складовими, амплітуди яких становлять 0% (крива 1), 30% (крива 2) і 40% (крива 3) від величини постійної складової.

Рис.13. Криві потужності ВЕА залежно від швидкості вітру

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено теоретичне обґрунтування і розв'язання науково-практичної задачі, що полягає в розробці комплексу науково-технічних способів з підвищення експлуатаційної надійності АГ ВЕА, що досягається за рахунок зниження механічних перевантажень ВЕА. Розроблені методики розрахунку і способи зниження механічних перевантажень ВЕА в перехідних режимах, а також рекомендації щодо конструкції АГ ВЕА, які дозволяють забезпечити кліматичну стійкість останніх.

1. Питання демпфування ударних струмів і моментів та забезпечення кліматичної стійкості АГ ВЕА вимагають більш глибокого вивчення, тому що вони дозволять виключити найбільш характерні поломки, які спостерігалися при експлуатації ВЕА на діючих ВЕС. Виходячи з цього доцільною є розробка методик розрахунку ударних струмів і моментів, способів їхнього зниження і забезпечення кліматичної стійкості АГ ВЕА.

2. Розроблено методику розрахунку в перехідному процесі струмів і моментів АГ ВЕА при підмиканні на паралельну роботу з мережею. Методика дозволяє розраховувати перехідні процеси в АГ ВЕА при його підмиканні на паралельну роботу з мережею, як з демпфуючими опорами у колі статора, так і без них. На відміну від існуючих методик, розроблена методика враховує вплив на характер перехідного процесу активного опору статора.

3. Встановлено, що шунтування демпфуючого опору необхідно робити тільки після згасання аперіодичних складових струмів що виключає сплески струмів і моментів, більші за ті, що були при увімкненому опорі. Час загасання аперіодичних складових струмів для різних типів АГ складає від 0,2 до 1,5 сек. Запропоновано включати на час пуску послідовно з обмотками генератора активні опори, значення яких у 3-3,5 рази більші за активний опір обмотки статора. При цьому кратність ударного моменту не перевищує 1, а кратність струму – 7. Максимальна кратність моменту не залежить від початкової фази напруги при одночасному підмиканні фаз АГ до мережі.

4. Отримано розв'язання системи диференціальних рівнянь при почерговому підмиканні фаз генератора до мережі. Встановлено найбільш раціональну послідовність підмикання фаз обмотки АГ до мережі, визначено початкові фази напруги.

Встановлено, що при неодноразовому підмиканні до мережі фаз АГ ВЕА кратність ударних струмів і моментів знижується в 2 рази.

Запропоновано робити підмикання двох фаз генератора до мережі у момент часу, що відповідає амплітудному значенню лінійної напруги, а третю фазу підмикати при амплітудному значенні фазної напруги із запізнюванням у 9-12 періодів.

5. У систему диференціальних рівнянь, що описують електромагнітні процеси в АМ, введено функцію, що встановлює безпосередній зв'язок між гармонійними складовими швидкості вітру і моментом на валу генератора.

6. Запропоновано пристрій, що здійснює неодноразове підмикання фаз генератора до мережі. За рахунок запропонованого виконання кола керування досягається забезпечення вмикання силового кола при проходженні синусоїдальної напруги через амплітудне значення, за відхилень напруги мережі живлення, що відповідають нормативам. Також забезпечується практично сталі значення фази напруги, при якій відбувається вмикання і, за рахунок цього, забезпечується підвищення надійності пристрою і спрощення його конструкції.

При проектуванні ВЕА варто враховувати пульсуючий з подвоєною частотою мережі момент, що виникає при двофазному включенні, що викликає вібрацію ВЕА.

7. Теоретично обґрунтовано вплив коливань швидкості вітру на потужність, що віддається вітротурбіною. У систему диференціальних рівнянь, що описують електромагнітні процеси у АМ, введено функцію, що встановлює безпосередній зв'язок між гармонійними

складовими швидкості вітру і моментом на валу генератора. Розраховано розбіжність між потужністю, що виробляє вітротурбіна, і потужністю, встановленою для вітротурбіни виготовлювачем, при заданій середній швидкості вітру.

8. Отримано акт впровадження результатів дисертаційної роботи в КБ ДП ХЕМЗ (м.Харків).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Дорохов А.В., Финкельштейн В.Б. Демпфирование ударных токов и ударного динамического момента при подключении к сети асинхронных генераторов ветроэлектроагрегатов // Електротехніка і електромеханіка. –Харків: НТУ ХПІ, 2002.-№2.- С.39-42.

Здобувач дослідив та висвітлив можливість зниження перехідних струмів і ударного динамічного моменту за рахунок неоднчасного підмикання фаз обмотки генератора на паралельну роботу з мережею. Надано рекомендації щодо формування оптимального алгоритму вмикання. Описано явища супутні перехідному процесу.

2. Дорохов А.В., Финкельштейн В.Б. Экспериментальное исследование экстремальных эксплуатационных параметров и характеристик асинхронных генераторов ветроэнергетических агрегатов // Праці інституту електродинаміки Національної академії наук України. - Київ: ІЕД НАН України, 2002.- №3.- С.107-112.

Здобувач надав рекомендації щодо вибору АГ для ВЕА, а також навів результати експериментальних досліджень, необхідних для розробки специфічних питань теорії розрахунку характеристик АГ у перехідних і сталих режимах і удосконалення пускової та захисної апаратури.

3. Дорохов А.В., Финкельштейн В.Б. Смягчение электродинамических перегрузок при подключении к сети асинхронных генераторов ветроэлектроагрегатов // Електротехніка і електромеханіка – Харків: НТУ ХПІ, 2003.- №2.- С.24-27.

Здобувач розробив методику розрахунку перехідних струмів і ударного динамічного моменту при підмиканні АГ до мережі.

4. Дорохов А.В., Финкельштейн В.Б. Токи и моменты асинхронных генераторов ветроэлектроагрегатов в переходном режиме при подключении их к сети // Технічна електродинаміка. - Київ: ІЕД НАН України, 2003.- №2.- С.52- 54.

Здобувачем наведено методику розрахунку в перехідному процесі струмів і ударного динамічного моменту АГ при його підмиканні на паралельну роботу з мережею. Запропоновано технічне рішення, що виключає перевантаження та ударні динамічні моменти і знижує кратності максимального струму до значень, передбачених нормативною

документацією на АМ.

5. Дорохов А.В., Финкельштейн В.Б. Влияние турбулентности ветра на величину мощности генерируемой ветроэлектроагрегатом // Праці інституту електродинаміки НАН України .- Київ: ІЕД НАН України, 2003. №1(4) - С.89 –98.

Здобувач експериментально встановив, що потужність, генерована ВЕА при однакових середніх швидкостях вітру, може суттєво відрізнятися від відповідних значень каталожної потужності. Запропонована здобувачем математична модель дозволяє розрахувати величину генерованої ВЕА потужності при заданій середній швидкості вітру.

6. Дорохов А.В. Динамические характеристики асинхронных генераторов при подключении их к сети через демпфирующее сопротивление с последующим его шунтированием // Електротехніка і електромеханіка. –Харків: НТУ ХПІ, 2003. - №4.- С.26-31.

Експериментально встановлено, що потужність, яку генерує вітроэлектроагрегат при однакових середніх швидкостях вітру може суттєво відрізнятися від відповідних значень каталожної кривої потужності. Одним із факторів, від якого залежить ця різниця, є турбулентність вітру. Запропонована математична модель, яка дозволяє розрахувати значення потужності, яку генерує вітроэлектроагрегат при заданих турбулентності і середній швидкості вітру.

7.Дорохов А.В., Финкельштейн В.Б. Неодновременное подключение фаз асинхронного двигателя к трехпроводной сети // XXIX научно-техническая конференция преподавателей, аспирантов и сотрудников Харьковской государственной академии городского хозяйства. Программа и тезисы докладов. - Харьков: ХНАГХ, -1998.-С.28-29.

8. Пат.60068 А Україна, МКИ 7 Н02Р 1/16. Пристрій для обмеження ударних струмів і моментів при підмиканні машин змінного струму до мережі й обмеження перенапруг при їхньому відключенні: Пат.60068 А Україна, МКИ 7 Н02Р 1/16 / О.В. Дорохов, А.Г. Сосков, В.Б. Фінкельштейн. - № 2003010519; заявлено 21.01.2003; Опубл. 15.09.2003. Бюл. № 9.- 2с

Здобувач розробив пристрій для обмеження струмів і ударного динамічного моменту при підмиканні машин змінного струму до мережі й обмеження перенапруг при їхньому відключенні.

АНОТАЦІЇ

Дорохов О. В. Зниження динамічних перевантажень з метою підвищення надійності асинхронних генераторів вітроэлектроагрегатів, які працюють паралельно з мережею. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.09.01 –

електричні машини і апарати. – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, м. Харків, 2004.

Дисертація присвячена питанням розрахунку ударних перехідних струмів і ударного динамічного моменту, а також розробці можливих методів їхнього демпфування. При вмиканні АГ на паралельну роботу з мережею, за рахунок практично нерухомих аперіодичних складових поточкозчеплення у роторі, що обертається із синхронною швидкістю, наводиться велика згасаюча ЕРС, що зумовлює виникнення у генераторі струму, кратність якого на початку перехідного процесу може сягати 11. Одночасно виникає згасаючий знакозмінний момент, кратність якого в окремі моменти часу сягає 3. Зазначені ударні струми та ударні динамічні моменти вкрай несприятливо впливають на роботу ВЕА, призводячи до виходу з ладу механічної частини та аварійних відключень, зумовлених несанкціонованим спрацюванням апаратів захисту. Тому з метою підвищення ефективності ВЕА запропоновано заходи зі зниження перевантажень. Запропонований пристрій для неодночасного підмикання фаз АГ до мережі дозволяє домогтися зниження ударного струму та ударного моменту у два рази. Розроблені методика і програма розрахунку генерованої ВЕА потужності на підставі даних метеостанцій про характер коливань швидкості вітру конкретного району та їхніх часових змін дозволяють розраховувати вироблювану ВЕА потужність залежно від кліматичних умов у районі його установки. Розроблено рекомендації щодо забезпечення кліматичної стійкості АГ ВЕА, методику розрахунку генерованої ними потужності. При проектуванні ВЕА слід враховувати пульсуючий з подвоєною частотою мережі момент, що виникає при двофазному вмиканні і викликає вібрацію ВЕА. Дано рекомендації щодо вибору оптимальної потужності АМ у генераторному режимі.

Ключові слова: асинхронний генератор, вітроелектроагрегат, ударні перехідні струми та момент.

Дорохов А. В. Снижение динамических перегрузок с целью повышения надежности асинхронных генераторов ветроэлектроагрегатов, работающих параллельно с сетью. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – электрические машины и аппараты. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2004.

Диссертация посвящена вопросам расчета ударных переходных токов и моментов, а также разработке возможных методов их демпфирования. При включении АГ на параллельную

работу с сетью за счет практически неподвижных апериодических составляющих потокосцепления в роторе, вращающемся с синхронной скоростью, наводится большая затухающая ЭДС, обуславливающая возникновение в генераторе тока, кратность которого в начале переходного процесса может достигать до 11. Одновременно возникает затухающий знакопеременный момент, кратность которого в отдельные моменты времени достигает до 3.

Эти ударные токи и моменты крайне неблагоприятно влияют на работу ВЭА, приводя к поломкам механической части и аварийным отключениям, обусловленным несанкционированным срабатыванием аппаратов защиты. Наличие указанных электродинамических перегрузок приводит к росту материалоемкости механической части ВЭА и к завышению типоразмеров пускозащитной аппаратуры. Поэтому, с целью снижения материалоемкости и стоимости ВЭА и соответствующего повышения их эффективности, предложены мероприятия, снижающие перегрузки.

Одним из таких мероприятий является включение последовательно с обмотками генератора на время пуска активных сопротивлений, величина которых в 3-3,5 раза больше активного сопротивления обмотки статора. При этом кратность ударного момента не превышает 1, а кратность тока – 7.

Снижение ударных токов и моментов при запуске ВЭА можно также достичь при неодновременном подключении фаз генератора к сети, что позволяет примерно в два раза снизить кратности ударных моментов и токов. Включение двух фаз необходимо производить в момент времени, когда максимально линейное напряжение, к которому эти фазы подключаются, а подключение третьей фазы - в момент времени, когда максимально фазное напряжение.

Подключение третьей фазы, при неодновременном включении, следует производить по прошествии 9-12 периодов, что при частоте сети 50 Гц составляет 0,18 – 0,24 сек.

Предложенное устройство для неодновременного подключения фаз АГ к сети позволяет добиться снижения ударного тока и ударного момента в два раза.

Для обеспечения устойчивости АГ к климатическим воздействиям их следует проектировать и изготавливать в исполнении IP44 или IP54.

Подшипники генераторов необходимо выбирать с запасом по прочности, с тщательным контролем в исходном состоянии, так как при наличии сколов на рабочих поверхностях за счет знакопеременного гироскопического момента эти сколы увеличиваются и подшипники выходят из строя.

Разработанные методика и программа расчета генерируемой ВЭА мощности на основании данных метеостанций о колебаниях скорости ветра конкретного района и их временных изменениях позволяют рассчитывать вырабатываемую ВЭА мощность в

зависимости от климатических условий в районе его установки.

При проектировании ВЭА следует учитывать пульсирующий с удвоенной частотой сети момент, возникающий при двухфазном включении и вызывающий вибрацию ВЭА.

При выборе генератора ВЭА следует учитывать, что генератор подвергается дополнительному обдуву и при одинаковых коэффициентах мощности и номинальном токе мощность генератора в $1/\eta$ раз больше мощности двигателя. Так как в качестве генераторов используются АМ, предназначенные для двигательного режима, для генераторного режима следует выбирать АМ, которая в двигательном режиме имеет номинальную мощность, на одну ступень уменьшенную, по сравнению с мощностью в генераторном режиме.

Ключевые слова: асинхронный генератор, ветроэлектроагрегат, ударные переходные токи и моменты.

Dorokhov A. V. Lowering of dynamic overloads about the purpose of a reliability augmentation of induction generators of wind turbines operating in bridge with a network. - Manuscript.

Thesis for candidates degree by specialty 05.09.01 - electric machines and apparatus. - National technical university "Kharkov polytechnic institute ", Kharkov, 2004.

The thesis is dedicated to problems of calculation of impact transient currents and moments, and as to mining of possible methods of their damping. At actuation of an induction generator on parallel operation with a network, for the score practically of fixed aperiodic components of flux linkage, in a rotary table rotated with synchronic speed, the large fading EMF stipulating originating in a current source is induced(guided) the ratio which one in the beginning of transient can reach up to 11. Simultaneously there is a fading alternating moment, the ratio which one in separate instants reaches up to 3. These impact currents and moments extremely unfavorably influence activity wind turbines, resulting to breakings a mechanical part and emergency switching-off(cut-outs) conditioned unauthorized actuation of vehicles of protection. Therefore, with the purpose of a decrease of specific consumption of materials both cost wind turbines and conforming increase of their efficiency, the measures lowering overloads are offered. The offered device for non-simultaneous hooking up of phases of an induction generator to a network allows to achieve a decrease of an impact current and impact moment twice. At designing wind turbines it is necessary to allow for the moment, pulsating with doubled frequency, that produces chattering wind turbines. A designed technique and program of calculation generated wind turbines of power it is ground of the data of meteorological stations about oscillations of wind speed of concrete region and their temporary changes allow to calculate developed wind turbines power depending on climatic conditions in region of his installation.

Recommendations of choice of AM optimum power in a generating mode and increase of climatic stability are given.

Key words: induction generator, wind turbines, impact transient currents and moments.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АГ - асинхронний генератор
- АМ - асинхронна машина
- ВЕА - вітроелектроагрегат
- ВЕС - вітроелектростанція
- ЕРС - електрорушійна сила
- ККД - коефіцієнт корисної дії
- НВДЕ - нетрадиційні відновлювані джерела енергії