

Метаевристичні алгоритми визначення оптимального розміщення вітрових турбін на вітровій електростанції

Завалій Олександр Миколайович

Науковий керівник: Хайдуров Владислав Володимирович

ктуальність застосування вітроенергетичних установок і вітрових турбін в умовах сьогодення.

Паризька угода 2015 року визначила відновлювану енергетику ключовим фактором у боротьбі зі зміною клімату, а вітроенергетику — головним джерелом чистої енергії. Однак ефективність вітрових електростанцій залежить від розміщення турбін. Для цього потрібно враховувати турбулентність від інших турбін, розміщення на рельєфі, вітра, а також який саме тип турбіни краще встановити саме на цій місцевості.

Методи оптимізації включають генетичні алгоритми, моделювання Монте-Карло, рою частинок та алгоритми мурашиних колоній. Впровадження різних діаметрів роторів і змінної висоти турбін дозволяє підвищити ефективність. Інновації у розташуванні та технологіях критично важливі для майбутнього розвитку вітроенергетики.

Огляд вітроенергетичних установок та технологій вітрових турбін.

Класифікація систем перетворення енергії вітру.

① Широка класифікація на основі осі вітрових турбін:

- Турбіна з горизонтальною віссю. Вісь обертання є горизонтальною, а лопаті аеротурбіни вертикальні. Направлення встановлюється до вітру.
- Турбіна з вертикальною віссю. Вісь обертання вертикальна. Вітрила або лопаті також можуть бути вертикальними.

② Класифікація за розміром:

- Малі турбіни (потужністю до 2 кВт). Використовуються в системах малої потужності.
- Турбіни середнього розміру (2–100 кВт).
- Великомасштабні або великогабаритні турбіни (100 кВт і більше). Використовуються для генерації електроенергії та розподілу в центральних електромережах.

③ Класифікація за типом вихідної потужності:

- Вихід постійного струму.
- Вихід змінного струму.

Огляд технологій вітрових турбін.

Технології вітрових турбін можна розділити на дві групи: вітрові турбіни з фіксованою швидкістю (FSWT) та вітрові турбіни зі змінною швидкістю (VSWT). Завдяки швидким інноваціям і розробкам силовій електроніки за останні роки відбулося величезне вдосконалення вітроенергетичних технологій. Це призвело до заміни FSWT на VSWT. Нижче наведено деякі з особливостей обох технологій вітрових турбін.

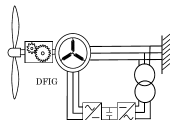
Клас вітрових турбін з фіксованою швидкістю (FSWT).

- Мають обмежений діапазон потужності, оскільки він працює з використанням фіксованої швидкості.
- Не мають можливості регулювання напруги та частоти.
- Мають міцну конструкцію, низькі експлуатаційні витрати, не потребують технічного обслуговування та прості у використанні.
- Потребують великої компенсації реактивної потужності під час перехідного стану, щоб відновити потік повітряного зазору.
- Є дорогим через встановлення зовнішніх пристроїв компенсації реактивної потужності, таких як гнучкі системи передачі змінного струму, які можуть бути статичними синхронними компенсаторами або енергетичними конденсаторами. Також потрібна надпровідна система зберігання магнітної енергії для забезпечення реактивної потужності.

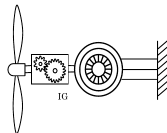
Клас вітрових турбін зі змінною швидкістю (VSWT)

- Мають високу ефективність перетворення енергії під час слабких та сильних вітрів, оскільки працюють зі змінною швидкістю.
- Мають менший акустичний шум і механічні навантаження.
- Мають кращу "якість" електроенергії в електромережах, не використовуючи зовнішніх компенсаторів реактивної потужності.
- Використовують перетворювачі потужності для вторинного збудження, від 20 до 30% для системи DFIG і 100% для системи PMSG.
- Мають нижчу вартість експлуатації, оскільки генерують електроенергію в мережу та допомагають забезпечити підтримку реактивної потужності для стабільності мережі.

Схеми турбін зі змінною швидкістю



(a)



(б)



(в)

Рис.: (а) вітрова турбіна асинхронного генератора з фіксованою швидкістю, (б) вітрова турбіна змінної швидкості індукційного генератора з подвійним живленням, (с) вітрова турбіна змінної швидкості синхронного генератора з постійним магнітом.

Математична модель оптимального розміщення вітрових турбін на електростанціях.

Wake Model

Термін «кільватерний слід» походить від сліду за кораблем. Як і кораблі, вітряні турбіни також створюють хвилі. Для вітряних турбін хвильовий ефект пов'язаний із дефіцитом швидкості вітру та зменшенням вмісту енергії після виходу з вітрової турбіни.

Отримуючи енергію з вітру, вітряна турбіна утворює уявний конус (шлях), який створює за собою повільніше та більш турбулентне повітря. Базуючись на припущенні про збереження імпульсу в кільватері, дефіцит швидкості на турбіні i (vel_def_{ij}), яка має відстань $x_{i,j}$ від турбіни j , можна обчислити за рівнянням:

$$vel_def_{ij} = 1 - \frac{u}{u_0} = \frac{2a}{(1 + \alpha \frac{x_{i,j}}{r_r})^2}$$

де u_0 (м/с) – швидкість вітру, $x_{i,j}$ (м) – відстань за потоком від вітрової турбіни, u – швидкість вітру за потоком після відстані $x_{i,j}$, r_r (м) – радіус ротора, a — коефіцієнт осьової індукції.

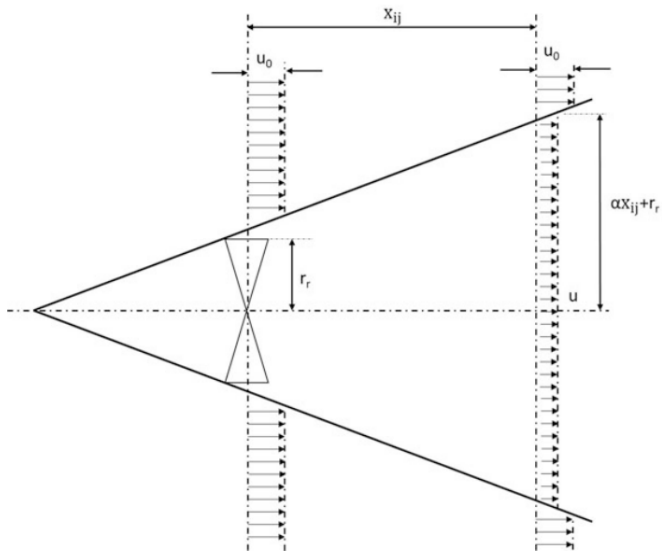


Рис.: Wake model

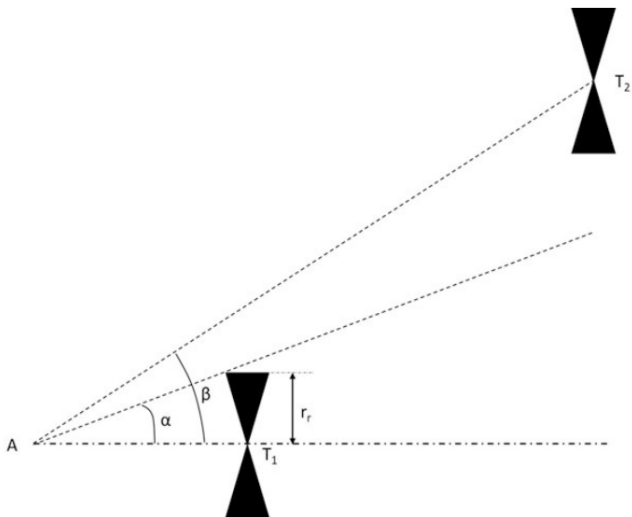


Рис.: Уявний конус вітрової турбіни.

Power Model

Виробництво електроенергії, P (Вт), від однієї вітрової турбіни наведено в рівнянні:

$$P = 0.5\rho\pi r_r^2 u^3 C_p$$

де ρ (кг/м³) - густина повітря, коефіцієнт потужності C_p - це частка доступної потужності вітру, яку вловлює турбіна. Це відображає ефективність перетворення потужності турбіни, яка в цій ситуації становить 42%. Загальна потужність, вироблена на вітряній електростанції, є сумою потужностей окремих турбін. Коли вітер протікає через турбіну, об'єм повітря, що надходить від турбіни має нижчу швидкість вітру та більшу турбулентність в порівнянні з вітром у вільному потоці. Таким чином, кожна з турбін може бути піддана впливу різної швидкості вітру, спричиненого хвилями.

Потужність розраховується за допомогою швидкості вільного потоку u , як рівняння:

$$P(u) = \begin{cases} 0kW, & u < 3.5 \\ 0.73u^3kW, & 3.5 \leq u < 13 \\ 850kW, & 13 \leq u < 20 \\ 0, & u \geq 20 \end{cases}$$

$$P_{tot} = \sum_i^N P_i$$

де N - загальна кількість вітрових турбін. А цільова функція це

$$\max \sum_i^N P_i$$

Висновки

Сучасний стан досліджень у галузі вітроенергетики демонструє значний прогрес у розвитку технологій вітрових турбін та оптимізації їх роботи. Основні напрями включають вдосконалення конструкцій турбін, підвищення їх ефективності та стійкості, впровадження нових матеріалів і систем контролю.

Водночас існує низка проблем. Серед них є обмеження практичного впровадження нових моделей у різних кліматичних та географічних умовах, необхідність зниження витрат на виробництво й обслуговування турбін, а також розв'язання проблем екологічного впливу.

Перспективи розвитку галузі полягають у подальшому вдосконаленні алгоритмів оптимізації розташування турбін, використанні штучного інтелекту для прогнозування ефективності роботи установок, а також у більш глибокому аналізі економічної рентабельності проєктів.

Вирішення цих завдань сприятиме підвищенню частки вітрової енергетики в загальному енергетичному балансі та забезпеченню сталого розвитку енергетики загалом.