

# NGHIÊN CỨU ÁP DỤNG ĐỊNH LUẬT BERNOULLI ĐỂ KIỂM TRA HỆ SỐ CHUYỂN ĐỔI NĂNG LƯỢNG GIÓ VÀ CÔNG SUẤT CỦA TURBINE GIÓ

Lưu Văn Phúc

Viện Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Vinh

Ngày nhận bài 09/02/2018, ngày nhận đăng 10/8/2018

**Tóm tắt:** Bài báo trình bày một số kết quả nghiên cứu áp dụng định luật Bernoulli trong động lực học chất lưu để kiểm tra hệ số Betz (còn gọi là giới hạn Betz, là giá trị giới hạn của hệ số chuyển đổi từ năng lượng gió thành động năng trên trục quay đối với turbine) và công suất của turbine gió lý tưởng. Phương pháp tính toán áp dụng nguyên lý bảo toàn khối lượng, bảo toàn năng lượng, mối quan hệ giữa áp suất và tốc độ của dòng gió đi chuyển qua một turbine được đặt trong ống dòng dạng hướng trục. Kết quả nghiên cứu cho thấy hệ số Betz tính toán theo phương pháp trên phù hợp với kết quả tính toán theo phương pháp phân tích hàm công suất turbine gió và phương pháp cân bằng khối lượng, động lượng một chiều của dòng chảy qua turbine gió trục ngang dẫn đến giới hạn Betz đã được công bố trước đây.

## 1. Đặt vấn đề

Định luật Betz chỉ ra hiệu suất chuyển đổi cơ năng cực đại từ năng lượng gió không phụ thuộc vào thiết kế của turbine gió trong điều kiện gió thổi tự do. Định luật này được công bố bởi nhà vật lý người Đức Albert Betz vào năm 1919. Theo đó, không có turbine gió nào có thể thu được trên 16/27 (59%) động năng của gió. Giá trị 59% được gọi là giới hạn Betz, là hiệu suất tối đa về mặt lý thuyết của turbine gió [1].

Trong những năm gần đây, cùng với nhu cầu phát triển năng lượng tái tạo, các nhà khoa học đã quan tâm nhiều đến turbine gió. Các nghiên cứu liên quan tới mô hình turbine điện gió dùng máy phát điện đồng bộ để kết nối với lưới điện [2], điều khiển nối lưới cho turbine gió kết hợp với nguồn điện pin nhiên liệu [3], hiệu suất turbine gió trục ngang được mô tả bởi lý thuyết của Betz [4], lý thuyết turbine gió và phương trình Betz với việc tối ưu tốc độ rotor [5]. Nội dung các công trình nghiên cứu đó đề cập tới giới hạn Betz với các phương pháp tiếp cận khác nhau như phương pháp phân tích hàm công suất turbine gió; phương pháp cân bằng khối lượng, động lượng một chiều của dòng chảy qua turbine gió trục ngang; phương pháp phân tích sự ảnh hưởng của góc xoay ( $\beta$ ), hệ số cao tốc ( $\lambda$ ) của cánh turbine đến công suất cơ thu được từ gió. Tuy nhiên, các kết quả thực nghiệm về turbine đã công bố cho thấy hiệu suất thực tế của các turbine gió trong thực tế bé hơn nhiều so với giới hạn Betz, chỉ nằm trong khoảng 35-45% [6].

Để giải quyết vấn đề trên, chúng tôi tiến hành áp dụng định luật Bernoulli để tính toán lại giới hạn của hệ số chuyển đổi năng lượng gió theo lý thuyết (giới hạn Betz) bằng một phương pháp khác, từ đó dẫn ra biểu thức xác định giới hạn Betz và tính công suất cơ của turbine gió lý tưởng.

## 2. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

### 2.1. Đối tượng nghiên cứu

Hệ số Betz, biểu thức tính hệ số Betz và công suất cơ của turbine gió lý tưởng.

### 2.2. Phương pháp nghiên cứu

- Vận dụng định luật Bernoulli vào nghiên cứu mô hình dạng ống dòng nằm ngang. Turbine được đặt trong ống dòng sao cho trục của nó song song với trục ống. Giả thiết dòng chất lưu chuyển động trong ống là lý tưởng: không có lực nội ma sát (lực nhớt) và không nén được, lưu lượng dòng chảy tuân theo phương trình liên tục và bỏ qua ma sát ở trục quay rotor của turbine.

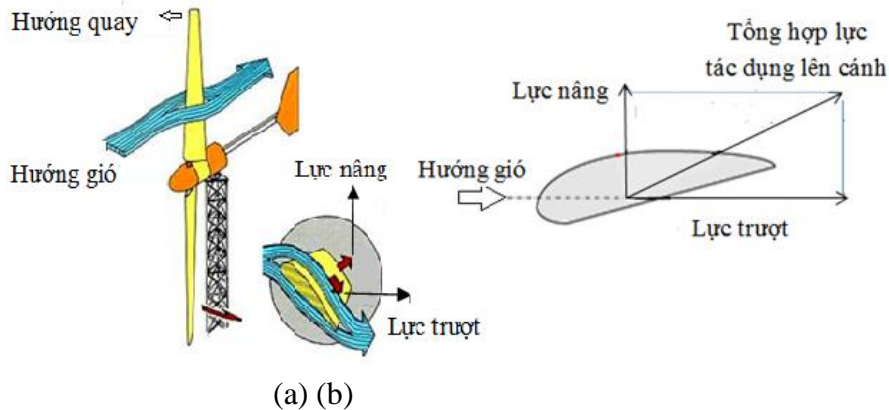
- Vận dụng phương pháp phân tích động lượng một chiều của dòng chảy qua một “đĩa truyền động” mà Albert Betz đã sử dụng.

## 3. Kết quả và thảo luận

### 3.1. Nguyên lý chuyển đổi năng lượng gió thành cơ năng trên trục của turbine gió

Năng lượng gió là động năng của dòng không khí chuyển động. Khi gió đập vào cánh turbine thì lực tác dụng lên cánh có thể được phân tích ra 2 thành phần (hình 1):

- Lực tác dụng dọc theo tiết diện cánh hay theo hướng gió được gọi là lực trượt;
- Lực tác dụng vuông góc với phương của gió được gọi là lực nâng.



**Hình 1:** Sơ đồ phân tích các lực tác dụng lên cánh turbine [3]

Kết quả là dòng không khí chuyển động sẽ làm quay cánh turbine. Động năng của dòng không khí chuyển thành động năng quay của turbine.

Lực tác dụng lên turbine phụ thuộc vào khối lượng riêng của không khí, tốc độ gió và diện tích quét của cánh theo công thức [4]

$$F = p.S = \frac{1}{2} \rho v^2 S \quad (1)$$

trong đó:

$p$ : áp suất động của gió tác dụng lên cánh turbine [ $N/m^2$ ];

$\rho$ : khối lượng riêng của không khí [ $kg/m^3$ ];

$v$ : tốc độ gió [ $m/s$ ];

$S$ : diện tích quét của cánh turbine [ $m^2$ ], được xác định bởi công thức  $S = \pi R^2$  với  $R$  là bán kính của cánh quạt.

Công suất gió tại vị trí đặt turbine được xác định bởi công thức:

$$P_{gio} = F.v = \left(\frac{1}{2} \rho v^2 S\right).v = \frac{1}{2} \rho v^3 S \quad (2)$$

Như vậy, công suất gió tăng theo lũy thừa bậc 3 của tốc độ gió. Vì thế tốc độ gió là một trong những yếu tố quan trọng, quyết định trong công nghệ turbine gió.

### 3.2. Áp dụng định luật Bernoulli để kiểm tra giới hạn Betz

Theo định luật Bernoulli, trong chất lưu lý tưởng với dòng chảy ổn định, tổng áp suất động và áp suất tĩnh có giá trị không đổi tại mọi vị trí dọc theo ống dòng.

Phương trình định luật Bernoulli có dạng

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g z = \text{hằng số} \quad (3)$$

trong đó:

$\frac{1}{2} \rho v^2$ : áp suất động [N/m<sup>2</sup>];

$p + \rho g z$ : áp suất tĩnh [N/m<sup>2</sup>];

$g$ : gia tốc trọng trường [m/s<sup>2</sup>];

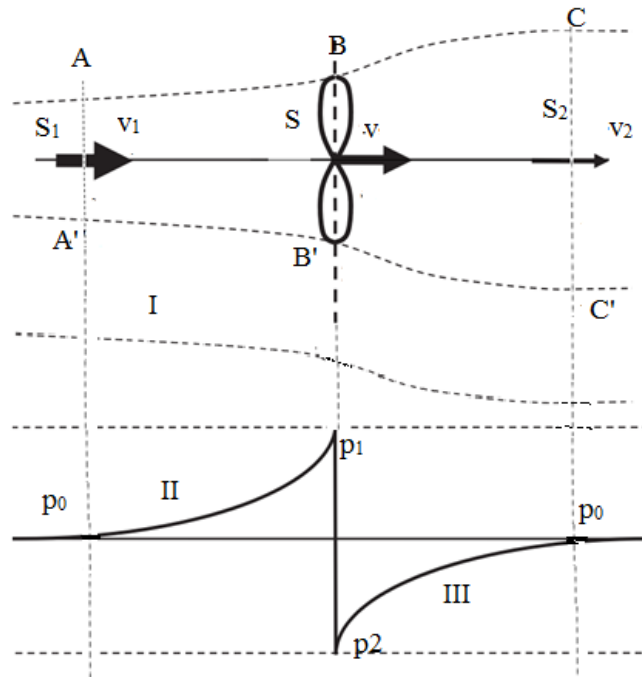
$z$ : độ cao trục của ống so với mặt đất [m].

Với trường hợp ống dòng nằm ngang thì phương trình (3) trở thành:

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{hằng số}. \quad (4)$$

Xét hai vị trí có tiết diện và tốc độ lần lượt là  $S_1, v_1$  và  $S_2, v_2$ , ta có:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2. \quad (5)$$



**Hình 2:** Sự thay đổi áp suất và tốc độ dòng khí trong mô hình turbine gió lý tưởng

Sự thay đổi áp suất và tốc độ dòng khí trong ống dòng được mô tả ở hình 2, trong đó A-A', B-B', C-C' lần lượt là mặt cắt trước, ngay tại và sau turbine. Sự thay đổi tốc độ dòng khí khi chuyển động qua ống chứa turbine được biểu diễn bởi đường cong I. Do sự cản trở của cánh turbine, tốc độ dòng khí sẽ giảm dần. Dòng khí bị nén làm áp suất khí tăng lên (biểu diễn bởi đường cong II). Tuy nhiên, ở ngay sau cánh turbine, tốc độ dòng khí tăng (do tiết diện ống dòng giảm vì bị cánh turbine chiếm chỗ) làm áp suất tại đó giảm đột ngột. Càng xa cánh turbine thì độ giảm áp suất này càng giảm (biểu diễn bởi đường cong III). Trong thực tế tốc độ của gió ở phía sau turbine không thể giảm xuống bằng không. Điều đó có nghĩa là chúng ta không thể chế tạo được turbine chuyển hoàn toàn động năng gió thành động năng trên trục quay.

Theo định luật II của Newton, lực tác dụng bởi gió lên cánh turbine có thể được viết dưới dạng [2]

$$F = ma = m \cdot \frac{dv}{dt} = \dot{m} \cdot \Delta v = \rho S v (v_1 - v_2) \quad (6)$$

trong đó:

$m$ : khối lượng không khí chứa trong thể tích  $vS$  [kg];

$\dot{m}$ : là lưu lượng không khí chuyển động qua tiết diện  $S$  [kg/s].

Công sinh ra bởi lực  $F$  của gió tác dụng lên trục turbine được xác định theo công thức

$$dA = F \cdot dx \quad (7)$$

Công suất cơ trên trục của turbine (chính là công suất chiết được từ công suất dòng gió) được tính theo công thức

$$P_t = \frac{dA}{dt} = F \cdot \frac{dx}{dt} = F \cdot v \quad (8)$$

Thay thế lực  $F$  đã tính ở (6) vào phương trình công suất turbine gió (8), ta được

$$P_t = \frac{dA}{dt} = F \cdot \frac{dx}{dt} = F \cdot v = \rho S v^2 (v_1 - v_2) \quad (9)$$

Tuy nhiên, công suất turbine gió cũng chính là độ biến thiên động năng của dòng khí ở trước và sau turbine trong một đơn vị thời gian:

$$P_t = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{\frac{1}{2} m v_1^2 - \frac{1}{2} m v_2^2}{\Delta t} = \frac{1}{2} \dot{m} (v_1^2 - v_2^2) \quad (10)$$

Kết hợp các phương trình (9) và (10), ta có thể viết:

$$\frac{1}{2} \rho S v^2 (v_1 - v_2) = \frac{1}{2} \dot{m} (v_1^2 - v_2^2) \quad (11)$$

hay

$$\rho S v^2 (v_1 - v_2) = \frac{1}{2} \rho S v (v_1^2 - v_2^2) \quad (12)$$

Từ phương trình (12) ta có

$$\frac{1}{2} (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} (v_1 - v_2)(v_1 + v_2) = v(v_1 - v_2) \quad (13)$$

với mọi  $v, S, \rho \neq 0$ , hay

$$v = \frac{1}{2}(v_1 + v_2) \text{ với mọi } (v_1 - v_2) \neq 0 \text{ hay } v_1 \neq v_2 \quad (14)$$

Từ phương trình (14) ta thấy rằng tốc độ gió tại vị trí đặt turbine bằng giá trị trung bình cộng của tốc độ gió ở phía trước và phía sau của turbine. Như vậy, turbine hoạt động như một cái phanh, giảm tốc độ gió từ  $v_1$  xuống đến  $v_2$  nhưng không hoàn toàn giảm tốc độ gió xuống  $v = 0$ , tại điểm đó phương trình không còn hợp lệ nữa. Để thu được năng lượng từ dòng gió, dòng chảy của nó phải được duy trì và không thể dừng lại.

Từ phương trình (9), công suất turbine gió có thể được biểu diễn như sau

$$P_t = \rho S v^2 (v_1 - v_2) = \frac{1}{4} \rho S (v_1^2 + v_2^2)(v_1 - v_2) = \frac{1}{4} \rho S (v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2) \quad (15)$$

Đặt  $b = \frac{v_2}{v_1}$ , phương trình (15) trở thành

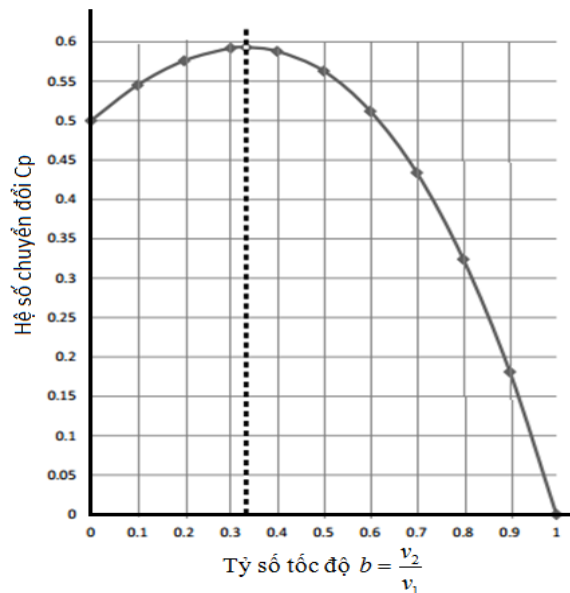
$$P_t = \frac{1}{4} \rho S (v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2) = \frac{1}{4} \rho S v_1^3 (1 - b^2)(1 + b) \quad (16)$$

Hệ số chuyển đổi năng lượng gió là tỷ số giữa công suất mà turbine thu được  $P_t$  (công suất hữu ích) và công suất gió  $P_{gio}$  xác định bởi công thức:

$$C_p = \frac{P_t}{P_{gio}} = \frac{\frac{1}{4} \rho S v_1^3 (1 - b^2)(1 + b)}{\frac{1}{2} \rho S v_1^3} = \frac{1}{2} (1 - b^2)(1 + b) \quad (17)$$

Phương trình (17) cho thấy hệ số  $C_p$  chỉ phụ thuộc vào tỷ số  $b = \frac{v_2}{v_1}$ . Đồ thị biểu diễn

sự phụ thuộc này được mô tả ở hình 3, trong đó giá trị cực đại của  $C_p$  xấp xỉ 0,59 hay 59%, tương ứng với giá trị  $b$  xấp xỉ bằng 0,33.



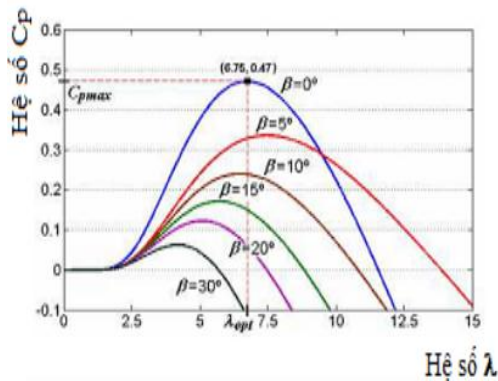
**Hình 3:** Đồ thị biểu diễn hệ số chuyển đổi công suất turbine gió  $C_p$  theo tham số  $b$

Như vậy, giá trị hiệu suất turbine gió cực đại thu được khi nghiên cứu theo mô hình ống dòng với sự vận dụng định luật Bernoulli cũng cho kết quả tự như kết quả đã được công bố trước đây của Albetz Betz.

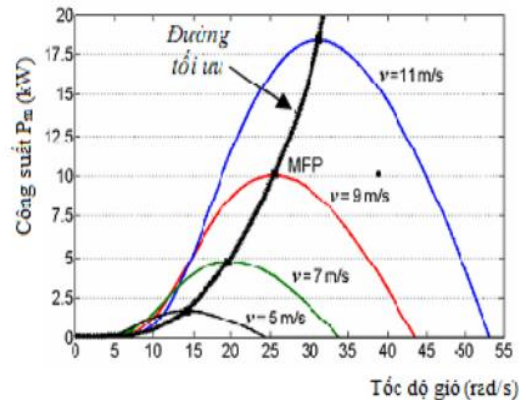
### 3.3. Một số kết quả nghiên cứu tiêu biểu gần đây về công nghệ turbine gió

Lý thuyết của Albert Betz và giới hạn Betz có ý nghĩa rất quan trọng, cho ta biết khả năng tối đa chuyển đổi năng lượng gió thành cơ năng trên trục quay turbine. Công suất của turbine gió được tính toán theo công thức tính công suất của định luật Betz cho giá trị rất cao nhưng giá trị thực tế của công suất này lại rất thấp. Công suất cao nhất mà turbine gió hiện nay đạt được chỉ khoảng 22% công suất thiết kế [7] trong điều kiện gió có tốc độ cao. Công suất của turbine gió với các loại tốc độ gió khác nhau cũng chưa được kiểm nghiệm bằng cách đo trực tiếp tại trang trại gió có cột đo tốc độ gió riêng biệt. Hiện nay, việc lấy số liệu tốc độ của gió căn cứ vào máy đo gió của turbine nên không thể hiện đúng tốc độ của trường gió vì máy đo tốc độ gió đặt sau cánh quạt và luồng gió đi qua máy đo còn bị phân tán bởi roto đầu trục turbine.

Việc sử dụng các phương tiện và công nghệ hiện đại để nghiên cứu turbine gió cho thấy việc tính toán chính xác hệ số công suất của turbine gió khá phức tạp, bởi nó chịu tác động của nhiều nhân tố ảnh hưởng như tốc độ gió, chiều cao tháp, góc xoay ( $\beta$ ), hệ số cao tốc ( $\lambda$ ) của cánh, số lượng cánh...



**Hình 4:** Đường đặc tính quan hệ giữa  $C_p$  và  $\lambda$  của turbine gió [8]



**Hình 5:** Đường đặc tính công suất và tốc độ của turbine gió [8]

Công suất đầu ra của turbine gió được tính theo công thức [8]

$$P_t = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho S}{2} v^3 \quad (18)$$

trong đó:

$P_t$ : công suất đầu ra của turbine (W);

$C_p(\lambda, \beta)$ : hệ số biến đổi năng lượng (là hàm số của tốc độ đầu cánh và góc cánh);

$S$ : diện tích quét của cánh quạt khi quay ( $m^2$ );

$\rho$ : mật độ của không khí ( $kg/m^3$ );

$v$ : tốc độ gió (m).

Hệ số biến đổi năng lượng  $C_p$  được tính theo công thức

$$C_p(\lambda, \beta) = 0,5176 \left( \frac{116}{\lambda} - 0,4\beta - 5 \right)^{\frac{21}{\lambda}} + 0,0068\lambda \quad (19)$$

với

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{1 + \beta^2} \quad (20)$$

#### 4. Kết luận

Bài báo trình bày kết quả áp dụng định luật Bernoulli kết hợp với phương pháp phân tích động lực chất lưu để kiểm tra hệ số Betz. Kết quả cho thấy giá trị giới hạn chuyển đổi năng lượng gió khi tính toán theo phương pháp này cho kết quả giống với kết quả tính toán bằng mô hình turbine gió dạng khuếch tán với “đĩa truyền động” mà Albert Betz đã công bố.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Trung Dũng, Nguyễn Tuấn Anh, *Ứng dụng năng lượng gió - xu thế chung và đánh giá dưới góc độ kinh tế và môi trường*, Tạp chí và tuyển tập hội nghị, Trường Đại học Thủy lợi, Số 17 (6/2007).
- [2] Trần Thanh Hào, *Năng lượng tái tạo*, NXB Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh, 2012.
- [3] Trần Thanh Hào, Tạ Huy Bích, *Giáo trình kỹ thuật năng lượng tái tạo*, NXB Đại học quốc gia TP Hồ Chí Minh, 2015.
- [4] Đặng Đình Thống, Lê Danh Liên, *Cơ sở năng lượng mới và tái tạo*, NXB Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 2012.
- [5] Đào Xuân Tiến, Nguyễn Xuân Trường, Đỗ Hữu Duật, Phạm Thị Lan Hương, *Nguyên lý làm việc, hiện trạng và xu hướng phát triển của hệ thống phát điện sử dụng năng lượng gió*, Tuyển tập hội nghị khoa học thường niên năm 2013.
- [6] F. Ben Amar, M. Elamouri, *Wind energy assessment of the Sidi Daoud wind farm - Tunisia*, ISBN 987-953-307-483-2, 2011, pp.122-135
- [7] Fernando D. Bianchi, Hernán De Battista and Ricardo J. Mantz, *Control design for a pitch-regulated, variable speed wind turbine*, Department of Electrical Engineering National, University of La Plata, Argentina, 2012.
- [8] Alejandro Rolán, Álvaro Luna, Gerardo Vázquez, Daniel Aguilar, *Modeling of variable speed wind turbine with a permanent magnet synchronous generator*, IEEE Interntation Symposium on Industrial Electronics, 2009.

## **SUMMARY**

### **APPLICATION OF BERNOULLI'S LAW TO CHECK THE LIMIT VALUE OF CONVERTING COEFFICIENT OF WIND ENERGY AND WIND TURBINE POWER**

This paper presents an application of Bernoulli's law to check the Betz coefficient (the limit value of converting from wind energy to rotational kinetic energy of wind turbine). The calculation method is based on the principle of conservation of mass, conservation of energy, and the relationship between the pressure and speed of air flow moving through a turbine, which is placed in a flow tube. The results show that the limit value of conversion from wind energy to rotational kinetic energy of turbine obtained by our method is consistent with the Betz value published previously.