

# ĐÁNH GIÁ SO SÁNH CÁC GIẢI PHÁP DUY TRÌ KẾT NỐI CỦA HỆ THỐNG NĂNG LƯỢNG GIÓ DFIG KHI LƯỚI BỊ SỰ CỐ

Văn Tấn Lượng\*, Nguyễn Thị Thanh Trúc, Trần Hoàn

Trường Đại học Công nghiệp Thực phẩm TP.HCM

\*Email: [luonghepc@gmail.com](mailto:luonghepc@gmail.com)

Ngày nhận bài: 07/7/2017; Ngày chấp nhận đăng: 18/5/2018

## TÓM TẮT

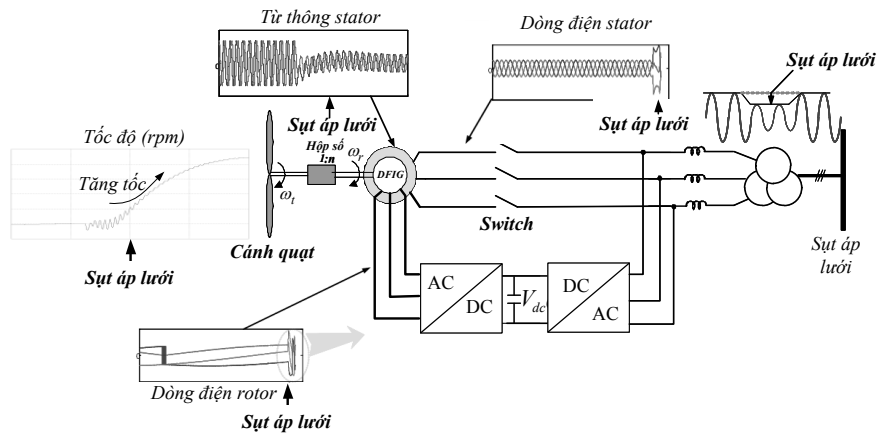
Máy phát điện gió loại không đồng bộ ba pha nguồn kép rất nhạy cảm với các nhiễu của lưới, đặc biệt là giảm áp lưới. Khả năng một tua-bin gió tiếp tục duy trì kết nối lưới khi có giảm áp lưới trong thời gian ngắn mà không bị ngắt được gọi là khả năng lướt qua điện áp thấp (LVRT). Các giải pháp như crowbar, bộ phục hồi điện áp động (DVR) và hệ thống lưu trữ năng lượng (ESS) được nghiên cứu để đảm bảo vẫn duy trì kết nối lưới khi có giảm áp. Bài báo trình bày các kết quả nghiên cứu và đánh giá các giải pháp điều khiển để thấy được khả năng vượt trội của chúng. Hệ thống DVR thể hiện đáp ứng vận hành tốt nhất thông qua việc giữ điện áp stator của máy phát không đồng bộ ba pha nguồn kép (DFIG) bằng hằng số khi có giảm áp cũng như điều kiện bình thường.

*Từ khóa:* Bộ phục hồi điện áp động, crowbar, độ giảm điện áp, hệ thống lưu trữ năng lượng, máy phát điện không đồng bộ ba pha nguồn kép.

## 1. MỞ ĐẦU

Gần đây, việc sử dụng năng lượng tự nhiên một cách hiệu quả đã tạo ra sự quan tâm nhiều kể từ khi cuộc khủng hoảng cạn kiệt nhiên liệu hóa thạch và ô nhiễm môi trường trở thành vấn đề nóng bỏng. Trong số các loại nguồn năng lượng tái tạo, năng lượng gió được xem như nguồn năng lượng đầy hứa hẹn và được thương mại hóa lớn nhất so với các nguồn khác. Các tua-bin gió có tốc độ thay đổi được, được trang bị bằng máy phát điện không đồng bộ ba pha nguồn kép (DFIG) và được ứng dụng phổ biến nhất do có nhiều lợi ích [1].

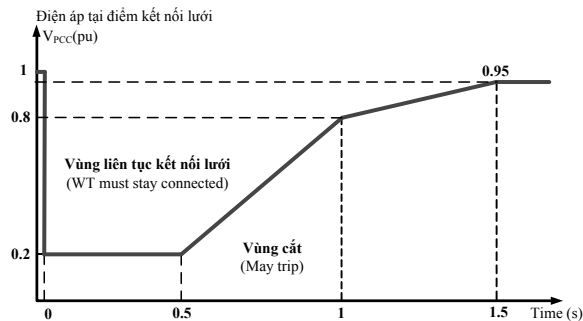
Khi có giảm áp xảy ra với DFIG, từ thông stator không thể thay đổi kịp sự thay đổi đột ngột điện áp stator và một thành phần DC xuất hiện trong từ thông stator, bởi vì thành phần tích phân giảm và vec-tơ từ thông stator trở nên gần như đứng yên. Rotor tiếp tục quay và độ trượt cao, gây ra tình trạng quá áp và quá dòng trong mạch rotor do ảnh hưởng của điện áp lưới. Sự cố điện áp nguồn bất đối xứng gây ra quá dòng và quá áp quá cao trong rotor do thành phần điện áp thứ tự nghịch có trong điện áp stator và độ trượt của thành phần thứ tự nghịch này rất cao [2]. Một số công trình nghiên cứu lớn đã và đang được tiến hành nhằm điều khiển hệ thống năng lượng gió dùng DFIG trong trường hợp giảm áp sâu và kết quả nghiên cứu cho thấy quá dòng rotor xảy ra ở trường hợp này (Hình 1). Ngoài ra, dòng điện tăng quá mức trong rotor làm tăng điện áp tụ DC. Hơn nữa, mức độ dao động dòng điện, công suất tác dụng và công suất phản kháng xảy ra trong máy phát cũng tăng cao [3-5].



Hình 1. Phản ứng của hệ thống năng lượng gió khi có sự cố giảm áp lưới

Khi có sự cố lưới, bộ nghịch lưu phía rotor (RSC) của DFIG có thể được khóa để bảo vệ mạch rotor khỏi hiện tượng quá dòng quá mức [6]. Tua-bin gió thường cắt trong thời gian ngắn sau khi bộ biến đổi công suất bị khóa và tự động được nối với lưới điện sau khi sự cố đã được giải quyết và vận hành trở lại bình thường như cũ. Tuy nhiên, điều này không còn được chấp nhận theo quy luật làm việc của lưới mới. Các quy luật này đòi hỏi trang trại gió tiếp tục được nối với lưới điện khi có sự cố giảm áp. Hình 2 thể hiện yêu cầu về lướt qua điện áp thấp (LVRT) theo quy luật làm việc của lưới điện Tây Ban Nha [7].

Giải pháp điều khiển kết nối liên tục của tua-bin gió DFIG với lưới trong trường hợp sự cố lưới đã được đề xuất trong nghiên cứu của Akhmatov [8]. Trong trường hợp này, RSC bị khóa và rotor bị ngắn mạch qua crowbar và DFIG trở thành máy phát điện không đồng bộ thông thường và bắt đầu hấp thụ công suất phản kháng từ lưới điện. Tua-bin gió tiếp tục hoạt động để phát ra công suất tác dụng và bộ chỉnh lưu phía lưới (GSC) có thể được dùng để điều khiển phát ra công suất phản kháng hay điều khiển điện áp lưới tại điểm kết nối lưới, tùy theo yêu cầu của lưới. Khi sự cố kết thúc, điện áp và tần số trong lưới điện được thiết lập lại, RSC sẽ khởi động lại và tua-bin gió sẽ trở lại hoạt động bình thường.



Hình 2. Quy luật làm việc của lưới điện Tây Ban Nha khi kết nối hệ thống tua-bin gió [7]

Một giải pháp khác dùng hệ thống tích tụ năng lượng (ESS) đã được đề xuất. ESS bao gồm một bộ chuyển đổi buck/boost DC-DC và một siêu tụ điện hai lớp điện (EDLC), được kết nối ở phía thanh cái DC của các bộ chuyển đổi back-to-back (back-to-back converters) [9-11]. Ngoài công dụng trên, ESS còn được sử dụng để nâng cao chất lượng điện năng ở đầu ra của máy phát bằng cách lưu trữ hoặc giải phóng các dao động công suất trong trường hợp tốc độ gió thay đổi ngẫu nhiên.

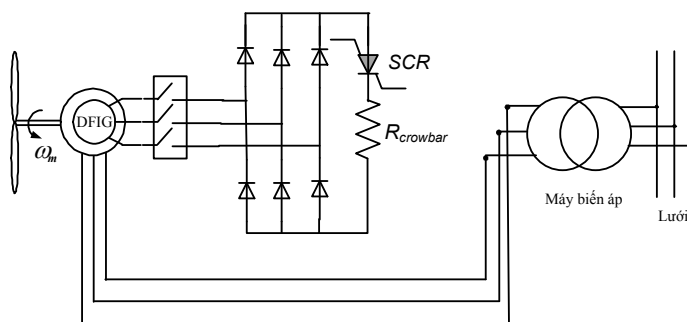
Ngoài ra, bộ phục hồi điện áp động (DVR) đã được đề xuất như một giải pháp để cô lập tua-bin gió DFIG bởi sự cố giảm áp lưới [12-13]. DVR là bộ chỉnh lưu nguồn điện áp (VSC) được mắc nối tiếp giữa máy phát điện gió và lưới điện, mà điện áp ngõ ra của nó được thêm vào lưới để bù cho sự cố sụt điện áp lưới.

Trong bài báo này, các giải pháp điều khiển LVRT như crowbar, DVR và ESS được áp dụng. Trước tiên, cơ sở lý thuyết về các giải pháp điều khiển LVRT đã được giới thiệu và phân tích. Sau đó, các kết quả mô phỏng từ việc mô phỏng hệ thống năng lượng gió dùng DFIG công suất 2 MW ứng với các giải pháp điều khiển khác nhau được cung cấp để so sánh, đánh giá ưu và khuyết của từng phương pháp.

## 2. GIẢI PHÁP ĐIỀU KHIỂN LƯỚT QUA SỰ CỐ GIẢM ÁP LƯỚI

### 2.1. Crowbar

Hệ thống bảo vệ crowbar bao gồm một điện trở và bộ chỉnh lưu diode 3 pha được nối ở phía rotor của máy phát DFIG (Hình 3). Giải pháp điều khiển crowbar dựa trên tiêu chuẩn quá áp tại thanh cái tụ DC-link và quá dòng trong dây quấn rotor, khi lưới có sự cố.

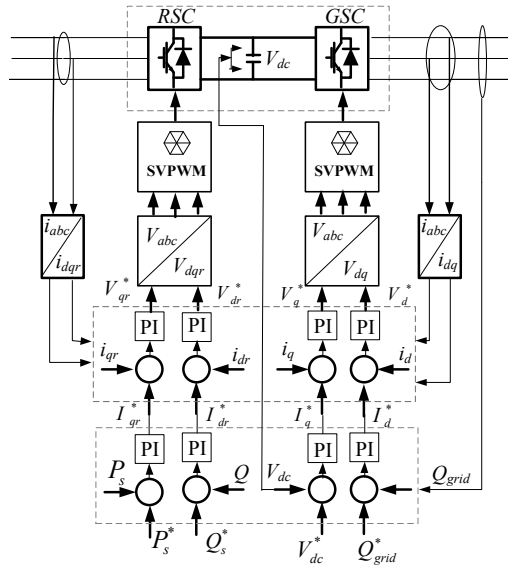


Hình 3. Hệ thống năng lượng gió DFIG với crowbar

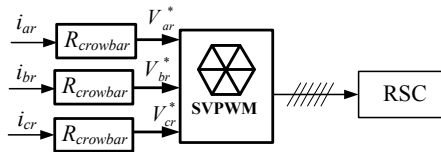
Sơ đồ khối điều khiển của DFIG được thể hiện trong Hình 4. Để bảo vệ các bộ chuyển đổi công suất trong điều kiện lưới bị sự cố, giải pháp dùng crowbar được áp dụng. Để quyết định khi nào crowbar được kích hoạt và bộ nghịch lưu phía rotor (RSC) bị khóa, hệ thống sẽ theo dõi các thông số liên quan như dòng rotor, dòng stator và điện áp DC. Khi ít nhất một trong các thông số này không phải là giá trị bình thường, bộ nghịch lưu phía rotor sẽ dừng chuyển mạch (tắc nghẽn) và crowbar được kích hoạt, khi đó rotor bị ngắn mạch thông qua điện trở crowbar. Dòng rotor bị giảm do sự gia tăng điện trở của rotor. Khi bộ nghịch lưu phía rotor bị khóa, nó sẽ đợi để khởi động lại từ hệ thống điều khiển. Khi điện áp lưới, tần số và dòng rotor quay trở lại giá trị bình thường, điện trở của crowbar bị ngắt kết nối và bộ chuyển đổi rotor bắt đầu chuyển đổi (chế độ đồng bộ) (Hình 5). Điện áp rotor ba pha cho RSC được đặt như sau:

$$\begin{aligned} V_{ar}^* &= R_{crowbar} \cdot i_{ar} \\ V_{br}^* &= R_{crowbar} \cdot i_{br} \\ V_{cr}^* &= R_{crowbar} \cdot i_{cr} \end{aligned} \quad (1)$$

Trong đó: các dòng rotor đo được ( $i_{ar}$ ,  $i_{br}$ ,  $i_{cr}$ ) là đầu vào của các bộ điều khiển.



Hình 4. Sơ đồ khối điều khiển năng lượng gió DFIG



Hình 5. Đồng bộ hóa ở bộ nghịch lưu phía rotor (RSC)

Tại thời điểm này, việc điều khiển công suất stator dựa vào bộ điều khiển tích phân tỷ lệ (PI) được áp dụng như trong Hình 5. Trong đó, công suất tác dụng stator tham chiếu,  $P_s^*$ , đạt được từ việc điều khiển phát công suất cực đại (MPPT) và công suất phản kháng stator,  $Q_s^*$  thường được cài đặt bằng 0 [14]. Công suất phản kháng lưới có thể được điều khiển theo giá trị tham chiếu ( $Q_{grid}^*$ ) và giá trị này có thể được cài đặt theo yêu cầu của lưới. Khi giá trị công suất stator đạt đến giá trị tham chiếu được thiết lập bởi bộ điều khiển thông thường, bộ nghịch lưu phía rotor sẽ trở về chế độ điều khiển thông thường.

## 2.2. Hệ thống lưu trữ năng lượng (ESS)

### 2.2.1. Điều khiển hệ thống ESS

Hệ thống lưu trữ năng lượng bao gồm bộ biến đổi DC/DC bán cầu và siêu tụ điện được kết nối tại thanh cái của tụ DC-link được thể hiện trong Hình 6.

Trong trường hợp lưới bình thường, ESS được dùng để loại bỏ dao động công suất phát ngõ ra bằng cách điều khiển siêu tụ điện hấp thụ thành phần dao động công suất ( $P_{fluc}$ ) từ lưới hoặc bơm thành phần dao động công suất cho lưới thông qua bộ lọc thông cao bậc hai. Công suất tham chiếu ESS,  $P_{ESS}^*$ , đạt được từ giá trị sai lệch công suất giữa công suất stator và rotor thông qua bộ lọc thông cao.

Ở trạng thái lưới bị sự cố, công suất tác dụng tham chiếu ESS,  $P_{ESS}^*$ , đạt được từ công suất tác dụng rotor ( $P_r$ ).

Hệ thống lưu trữ năng lượng bao gồm vòng lặp điều khiển công suất siêu tụ điện ở bên

ngoài và vòng lặp điều khiển dòng điện siêu tụ điện ở bên trong. Cả hai vòng lặp điều khiển công suất và dòng điện đều dùng bộ tích phân tỷ lệ. Ngõ ra của bộ điều khiển dòng điện siêu tụ điện là điện áp tham chiếu ( $V_L^*$ ). Từ giá trị điện áp tham chiếu này, ta tính được duty ratio ( $D_{ESS}$ ). Kỹ thuật điều chế độ rộng xung (PWM) được thực hiện bằng cách so sánh hệ số ( $D_{ESS}$ ) với sóng mang để tạo xung ( $g_1$  và  $g_2$ ) đóng cắt các khóa  $S_1$  và  $S_2$ .

### 2.2.2. Thiết kế siêu tụ điện

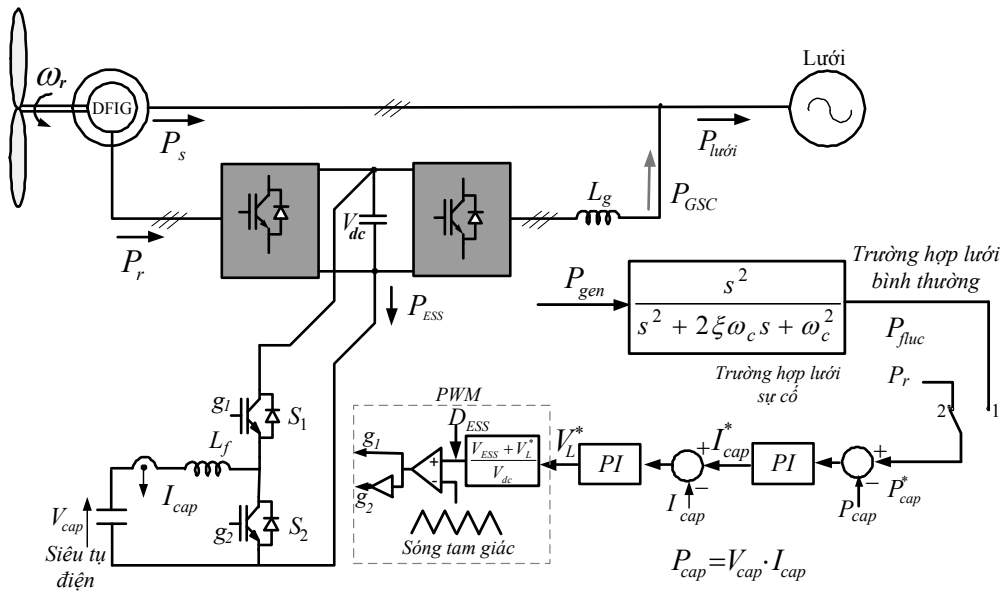
Năng lượng  $\Delta E$  được lưu trữ trong siêu tụ điện được tính như sau:

$$\Delta E = \frac{1}{2} C (V_{ESS,max}^2 - V_{ESS,min}^2) = P_{ESS} \Delta T \quad (2)$$

Trong đó:  $\Delta T$  là khoảng thời gian nạp hoặc xả cho việc làm phẳng công suất phát.

Công suất định mức của siêu tụ điện ( $P_{ESS}$ ) (giả sử bỏ qua tổn hao trên linh kiện) được chọn bằng 30% của toàn công suất hệ thống. Điện áp định mức của siêu tụ điện là 600 V. Điện áp nhỏ nhất khi xả được chọn là 50% (300 V) giá trị định mức của siêu tụ điện. Trong nghiên cứu này, ESS được thiết kế để nạp hoặc xả liên tục 30% công suất định mức hệ thống trong khoảng 45 s. Vì vậy, dung lượng của siêu tụ điện được tính toán như sau:

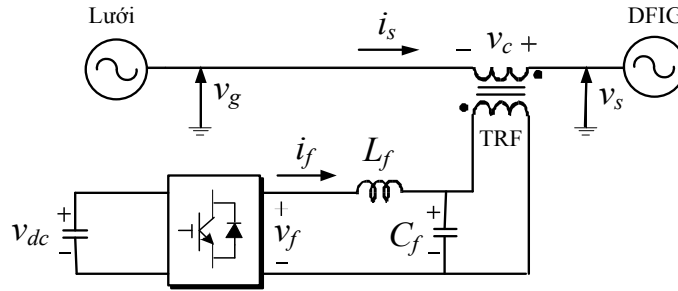
$$C = \frac{2P_{ESS} \Delta T}{V_{ESS,max}^2 - V_{ESS,min}^2} = \frac{2 \times 600000 \times 45}{600^2 - 300^2} = 200(F) \quad (3)$$



Hình 6. Bộ điều khiển dùng ESS

### 2.3. Bộ điều khiển điện áp động (DVR)

DVR là bộ nghịch lưu nguồn áp (VSI) được mắc nối tiếp với lưới điện thông qua bộ lọc LC (Hình 7). DVR là một giải pháp lý tưởng mà có thể tạo ra sự cách ly hệ thống tua-bin gió khi có độ võng điện áp (voltage dip) lưới lớn. Ngoài ra, DVR còn được dùng để bảo vệ tải nhạy cảm (sensitive loads) khi xuất hiện nhiễu trong lưới như giảm áp (voltage sag), tăng áp (swell), điện áp không cân bằng (unbalance), v.v.

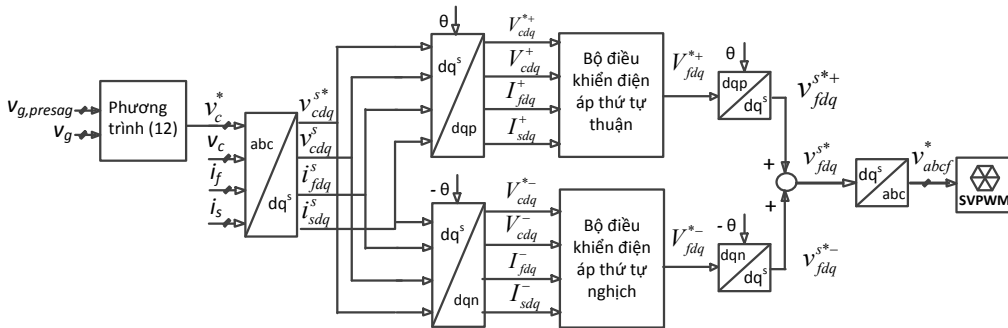


Hình 7. Sơ đồ mạch dùng DVR

Điện áp tham chiếu bồi hoàn được phát ra từ máy biến áp được viết như sau:

$$\begin{bmatrix} v_{ca}^* \\ v_{cb}^* \\ v_{cc}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{ga, presag} - v_{ga} \\ v_{gb, presag} - v_{gb} \\ v_{gc, presag} - v_{gc} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Trong đó:  $v_{ga, presag}$ ,  $v_{gb, presag}$  và  $v_{gc, presag}$  là điện áp trước khi xảy ra sự cố giảm áp;  $v_{ga}$ ,  $v_{gb}$  và  $v_{gc}$  là điện áp sau khi có sự cố giảm áp xảy ra trong hệ thống điện.



Hình 8. Sơ đồ khối điều khiển của DVR

Sơ đồ khối điều khiển DVR được thực hiện trong hệ trục tọa độ quay (dq) và kết hợp cả vòng lặp điều khiển dòng điện bên trong và cả vòng lặp bộ điều khiển điện áp bên ngoài (Hình 8). Trong đó, các bộ điều khiển điện áp và dòng điện thứ tự nghịch và thứ tự thuận được dùng kết hợp. Bộ điều khiển điện áp thứ tự nghịch được thêm vào để xử lý sự cố giảm áp không cân bằng (unbalanced voltage sags) vì thành phần thứ tự thuận chỉ có thể bồi hoàn sự cố độ võng điện áp cân bằng. Trong trường hợp mất cân bằng, các thành phần d và q trong bộ điều khiển thứ tự thuận không phải là thành phần DC và do đó chỉ sử dụng bộ điều khiển thứ tự thuận là không đủ. Bởi vì thành phần thứ tự nghịch được quay theo hướng ngược lại với thành phần thứ tự thuận. Do đó, cả bộ điều khiển điện áp thứ tự nghịch và thứ tự thuận được kết hợp điều khiển trong hệ thống.

### 3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN

Thông số của tua-bin gió và máy phát DFIG lần lượt được thể hiện trong Bảng 1 và 2.

Bảng 1. Thông số của tua-bin gió

Thông số	Giá trị
Công suất định mức	2 MW
Bán kính cánh quạt	39 m
Cường độ không khí	1,225 kg/m <sup>3</sup>
Hệ số chuyển đổi công suất cực đại	0,4
Tốc độ gió cận dưới	3 m/s
Tốc độ gió cận trên	25 m/s
Hệ số quán tính cánh quạt	6,3 × 10 <sup>6</sup> kg.m <sup>2</sup>

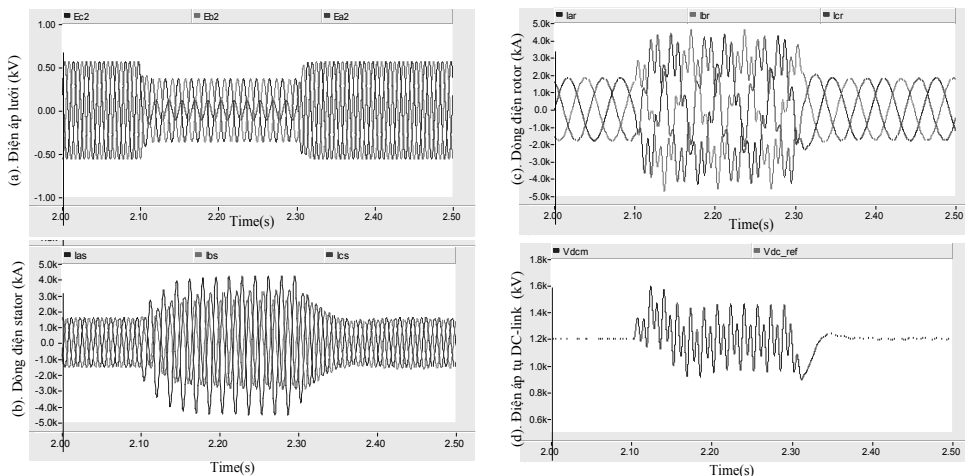
Bảng 2. Thông số của DFIG

Thông số	Giá trị
Công suất định mức	2 MW
Điện áp lưới	33 kV
Điện áp stator	690 V
Điện trở stator	0,00488 p.u
Điện trở rotor	0,00549 p.u
Điện cảm rò stator	0,0924 p.u
Điện cảm rò rotor	0,0995 p.u
Hệ số quán tính máy phát	200 kg.m <sup>2</sup>

### 3.1. Kết quả mô phỏng khi không dùng crowbar, ESS và DVR

Khi không dùng các giải pháp điều khiển crowbar, ESS và DVR, việc mô phỏng hệ thống năng lượng gió máy phát DFIG công suất 2 MW được thực hiện bằng phần mềm PSCAD 4.1.2. Sự cố lưới được giả định là sự cố giảm áp nguồn 3 pha không cân bằng và khoảng thời gian xảy ra sự cố là 200 ms, từ 2100 đến 2300 ms. Trong đó, điện áp pha A giảm 70%, pha B và pha C đồng thời giảm 30% so với điện áp pha định mức (Hình 9a).

Hình 9 thể hiện đáp ứng vận hành của hệ thống năng lượng gió DFIG trong trường hợp không dùng các giải pháp điều khiển trên. Dòng điện stator và rotor tăng lên đáng kể trong trường hợp có sự cố giảm áp (Hình 9b và 9c). Ngoài ra, điện áp tụ DC cũng tăng lên nhiều và độ thay đổi điện áp tụ DC là 33,3% so với giá trị điện áp tham chiếu. Như vậy, việc không thêm vào giải pháp điều khiển nào để hỗ trợ điều khiển hệ thống năng lượng gió kết nối với lưới làm cho các đáp ứng tăng cao. Điều này có thể gây ra rủi ro như phá hủy bộ nghịch lưu, gia tăng độ rung của trụ tháp và gián đoạn cung cấp điện, trường hợp lưới sự cố.

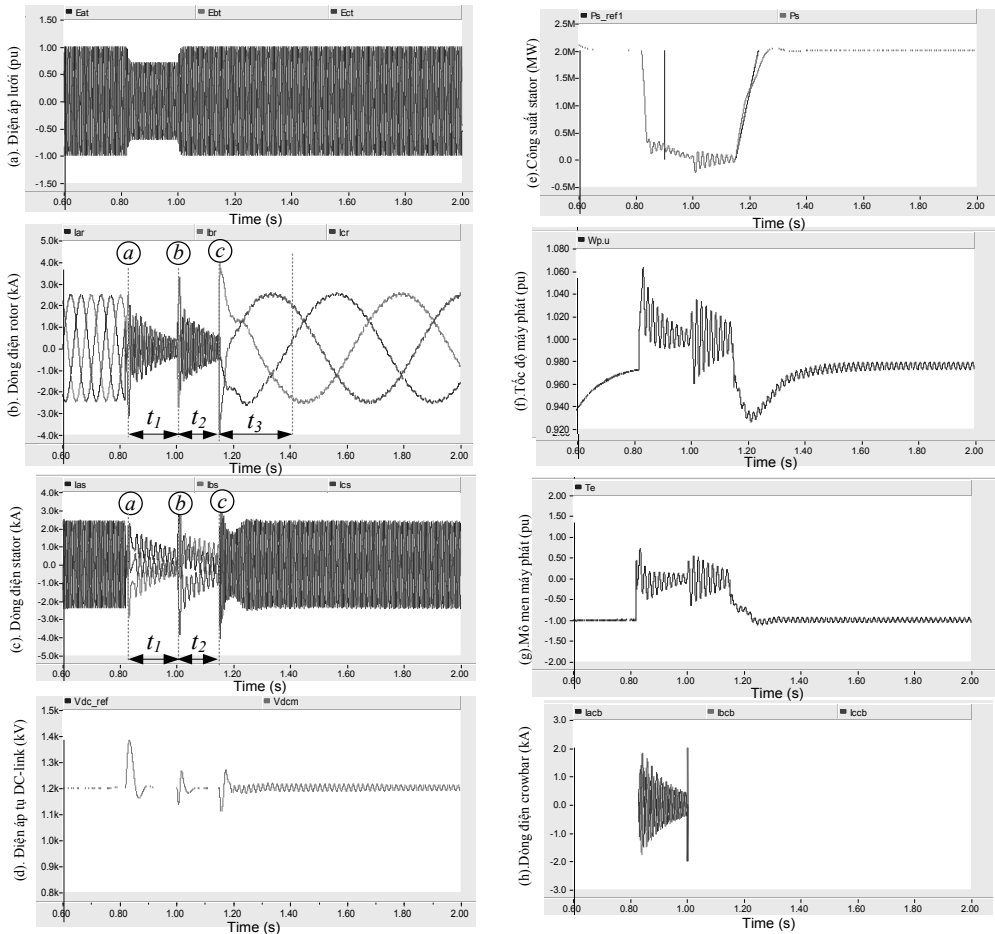


Hình 9. Kết quả mô phỏng PSCAD khi sự cố giảm áp lưới

### 3.2. Kết quả mô phỏng dùng crowbar

Việc mô phỏng dùng crowbar đã được áp dụng đối với hệ thống năng lượng gió dùng máy phát DFIG, công suất 2 MW. Trong bài báo này, điện trở của crowbar được thiết kế là

$R_{crowbar} = 0,024 \Omega$ . Các kết quả mô phỏng dùng phần mềm PSCAD được thể hiện trong Hình 10. Trong đó, sự cố lưới được giả định là sự cố giảm áp ba pha cân bằng (balanced voltage sags), điện áp ba pha xuống 30% so với định mức và khoảng thời gian xảy ra sự cố là 180 ms, từ 820 đến 1000 ms.



Hình 10. Kết quả mô phỏng DFIG dùng crowbar

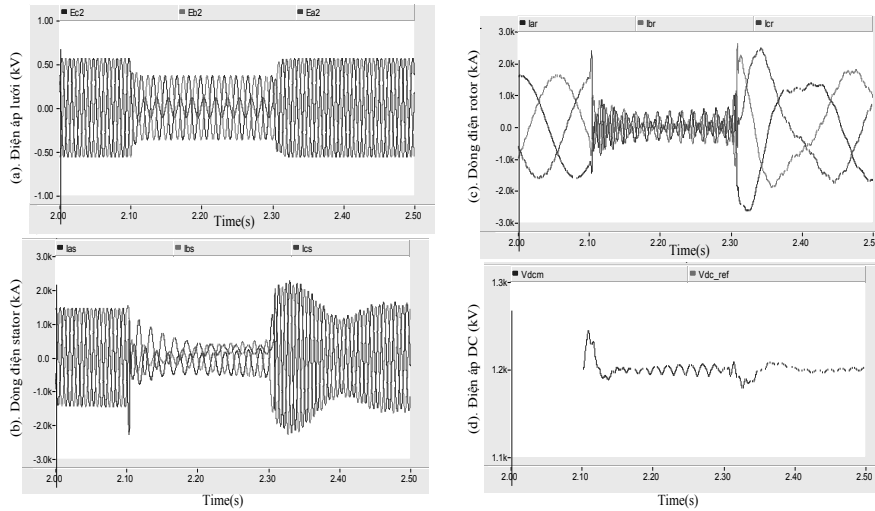
Ở thời điểm bắt đầu sự cố (điểm a),  $t = 820$  ms, crowbar được kích hoạt và bộ nghịch lưu phía rotor bị khóa, lúc này máy phát DFIG làm việc tương tự như máy phát không đồng bộ thông thường, với giá trị điện trở rotor được tăng lên bởi điện trở crowbar thêm vào. Sau khi sự cố kết thúc (điểm b), crowbar được ngắt khỏi mạch rotor và RSC bắt đầu quá trình hòa đồng bộ sau khoảng thời gian  $t_1$ . Với việc dùng crowbar, dòng điện rotor và stator có giảm xuống đáng kể. Tuy nhiên, phải mất thời gian  $t_2$  để quá trình hòa đồng bộ trở lại. Sau khoảng thời gian  $t_3$ , bộ nghịch lưu phía rotor đã khởi động làm việc trở lại như trường hợp lưới bình thường. Nhiệm vụ của crowbar là giảm dòng điện rotor tăng quá mức và ngăn ngừa gia tăng điện áp tụ DC trước khi quá trình đồng bộ hóa và khởi động lại bộ nghịch lưu. Tuy nhiên, trong trường hợp lưới tương đối yếu thì crowbar khó đảm bảo đủ bảo vệ mạch.

### 3.3. Kết quả mô phỏng dùng ESS

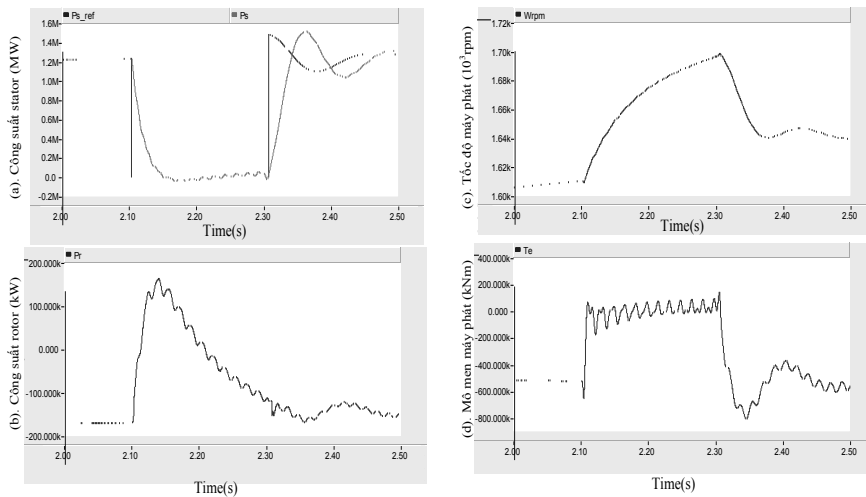
Việc mô phỏng hệ thống năng lượng gió dùng máy phát DFIG công suất 2 MW dùng ESS được áp dụng. Trong đó, sự cố lưới được giả định là sự cố giảm áp nguồn ba pha không cân bằng và khoảng thời gian xảy ra sự cố là 200 ms, từ 2100 đến 2300 ms. Trong đó, điện áp pha A giảm 70%, pha B và pha C đồng thời giảm 30% so với điện áp pha định mức (Hình 11a).



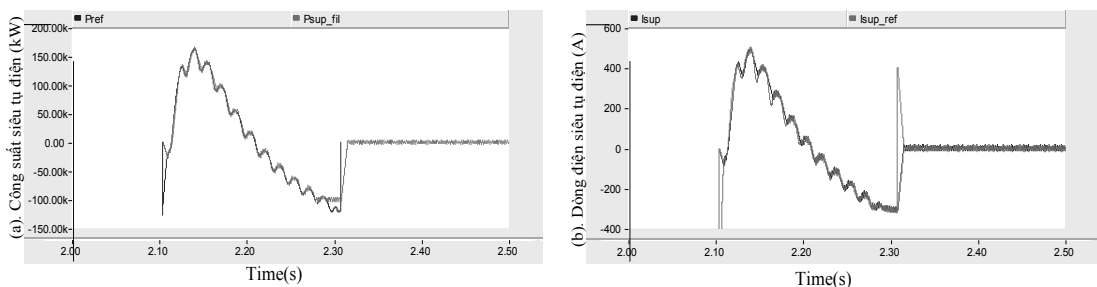
Dòng điện stator và rotor được giảm khi sử dụng ESS, trong trường hợp có sự cố (Hình 11b và 11c). Ngoài ra, đáp ứng của điện áp tụ DC cũng giảm đáng kể (Hình 11d). Công suất phát stator và mô men máy phát được điều khiển bằng không khi có sự cố (Hình 12a và 12d), trong khi đó tốc độ máy phát có sự tăng tốc đáng kể do quán tính của tua-bin (Hình 12d). Hình 13 thể hiện đáp ứng vận hành của hệ thống lưu trữ năng lượng ESS khi lưới bị sự cố.



Hình 11. Kết quả mô phỏng DFIG dùng ESS

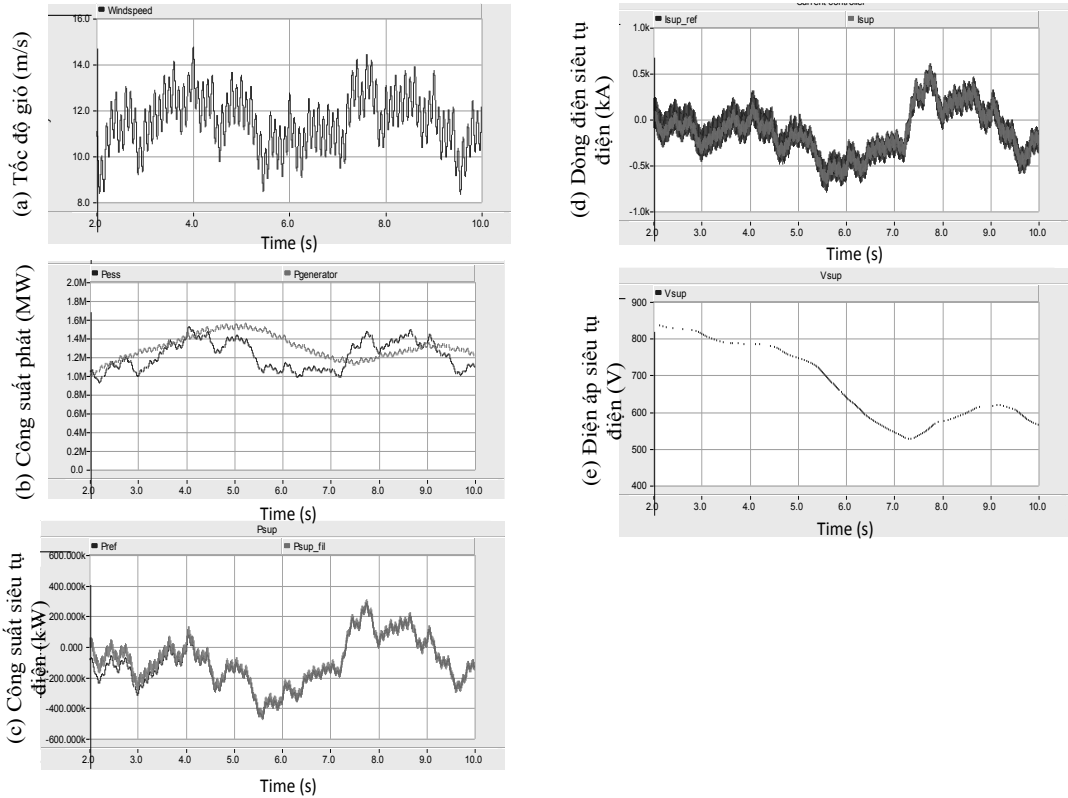


Hình 12. Đáp ứng của DFIG



Hình 13. Đáp ứng ESS

Hình 14 thể hiện đáp ứng làm phẳng công suất phát của hệ thống khi tốc độ gió thay đổi (Hình 14a). Thành phần dao động công suất phát ( $P_{fluc}$ ) được trích ra, thông qua bộ lọc thông cao (trong đó:  $\xi = 0,707; f_c = 0,1$  Hz) và được hấp thụ hay xả vào lưới bởi việc điều khiển ESS. Do đó, công suất lưới ( $P_{grid}$ ) trở nên phẳng hơn công suất phát ( $P_{gen} = P_s \pm P_r$ ) (Hình 14b). Ngoài ra, công suất, dòng điện và điện áp siêu tụ được thể hiện từ Hình 14c đến 14e.



Hình 14. Kết quả mô phỏng làm phẳng công suất phát dùng ESS

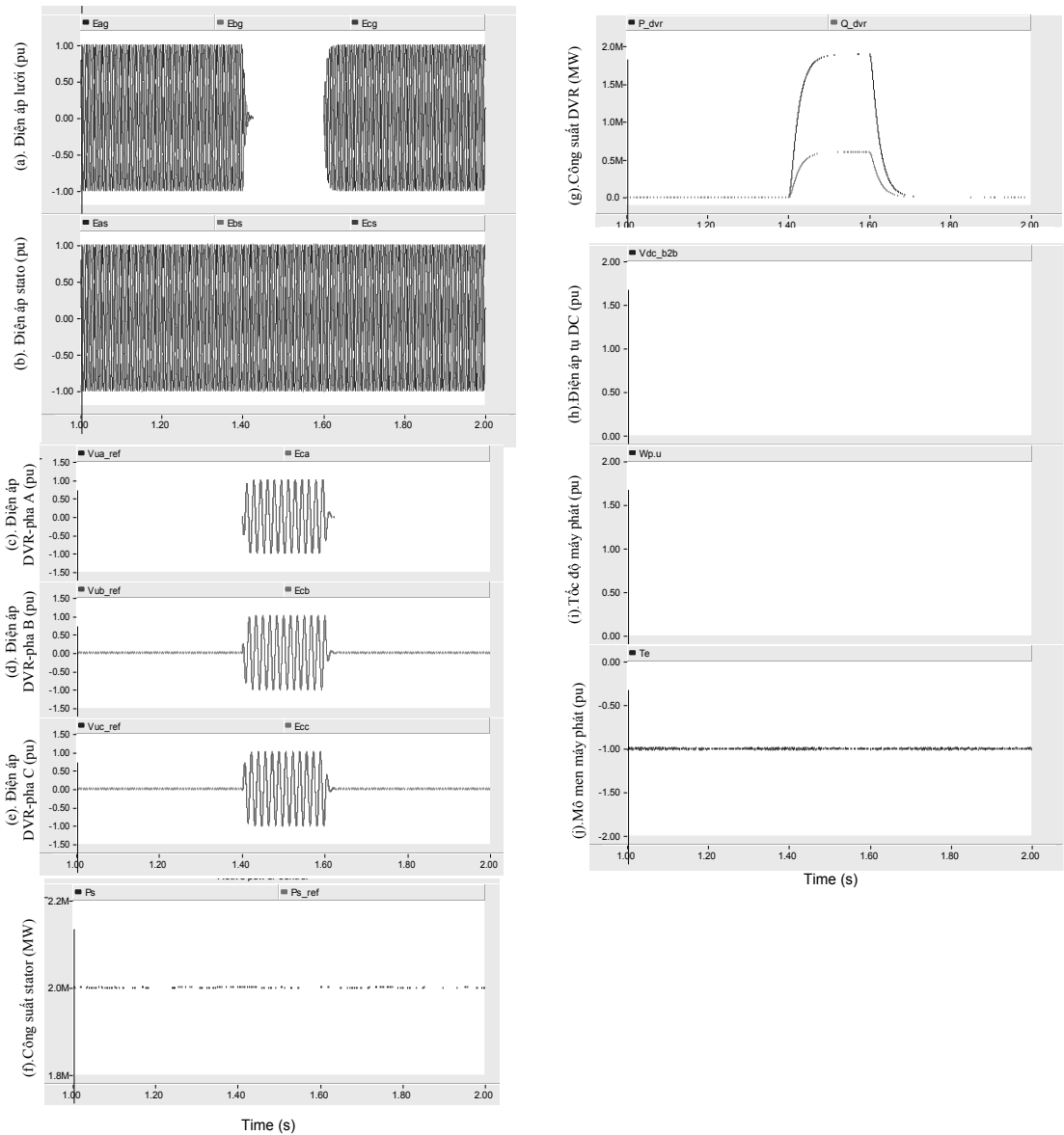
### 3.4. Kết quả mô phỏng dùng DVR

Việc mô phỏng hệ thống năng lượng gió máy phát DFIG công suất 2 MW dùng DVR đã được áp dụng. Sự cố lưới được giả định là sự cố gián đoạn nguồn 3 pha (interruptions) và khoảng thời gian xảy ra sự cố là 20 ms. Ở thời điểm bắt đầu sự cố,  $t = 1,4$  s, DVR được kích hoạt và điện áp được phát ra từ DVR được bù vào điện áp lưới (Hình 15c-15i). Lúc này, điện áp stator vẫn được giữ định mức và có dạng như Hình 15b. Ngoài ra, công suất phát stator, điện áp tụ DC và mô men máy phát vẫn được duy trì ở giá trị hằng số theo tốc độ gió không đổi (13 m/s). Kết quả mô phỏng cho thấy, mặc dù sự cố nguồn 3 pha bị gián đoạn, nhưng hệ thống năng lượng gió DFIG vẫn làm việc bình thường, như trường hợp không có sự cố.

Bảng 3 thể hiện sự so sánh về đặc điểm vận hành của các giải pháp điều khiển kết nối lưới khi có sự cố. Trong đó, DVR cho kết quả vận hành tốt nhất so với giải pháp dùng crowbar và ESS. Bảng 4 liệt kê các công dụng, chi phí và tính đơn giản trong điều khiển của crowbar, DVR và ESS. Trong đó, DVR có nhiều ứng dụng nhất so với crowbar và ESS, mặc dù chi phí DVR rất đắt.

Bảng 3. So sánh đặc điểm vận hành của các giải pháp điều khiển

Đại lượng	Đặc điểm vận hành		
	Crowbar	ESS	DVR
Công suất stator	Giảm	Giảm	Ổn định
Mô men máy phát	Méo dạng nhiều	Méo dạng ít	Ổn định
Tốc độ	Tăng và méo dạng	Tăng	Ổn định
Điện áp tụ DC	Độ vọt lố tăng	Độ vọt lố giảm	Ổn định



Hình 15. Kết quả mô phỏng DFIG dùng DVR

*Bảng 4. Liệt kê công dụng, chi phí và tính đơn giản điều khiển của crowbar, DVR và ESS*

Tiêu chí	Crowbar	ESS	DVR
Họa tần dòng điện	×	×	○
Điều khiển công suất phản kháng	×	×	○
Họa tần điện áp	×	○	○
Chập chòn điện áp (flicker)	×	□	○
Voltage dips	□	○	○
Chi phí	○	△	△
Tính đơn giản	○	□	□

Ghi chú: ○: tốt, □: trung bình, △: không tốt, ×: không có

#### 4. KẾT LUẬN

Các giải pháp điều khiển kết nối lưới khi có sự cố lưới như crowbar, ESS và DVR đã được nghiên cứu trong bài báo để đảm bảo yêu cầu liên tục kết nối lưới. Kết quả mô phỏng dùng phần mềm PSCAD cho hệ thống năng lượng gió DFIG công suất 2 MW được đưa ra để kiểm chứng tính vượt trội của từng phương pháp. Mỗi giải pháp điều khiển có ưu điểm và khuyết điểm riêng. Tuy nhiên, so với giải pháp dùng crowbar và ESS, thì giải pháp dùng DVR vượt trội hơn vì có thể đảm bảo được hệ thống năng lượng gió làm việc bình thường, bất chấp sự cố gián đoạn kết nối lưới.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Zhou Y., Bauer P., Ferreira J. A., and Pierik J. - Operation of grid-connected DFIG under unbalanced grid voltage condition, *IEEE Transactions on Energy Conversion* **24** (1) (2009) 240-246.
2. Seman S., Niiranen J., and Arkkio A. - Ride-through analysis of doubly fed induction wind-power generator under unsymmetrical network disturbance, *IEEE Transactions on Power Systems* **21**(4) (2006) 1782–1789.
3. Sun T., Chen Z., and Blaabjerg F. - Voltage recovery of grid-connected wind turbines after a short-circuit fault, *Proceedings of the 29<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (2003) 2723–2728.
4. Awad H., Svensson J., and Bollen M. - Mitigation of unbalanced voltage dips using static series compensator, *IEEE Transactions on Power Electronics* **19** (3) (2004) 837–846.
5. Nunes M. V. A., Lopes J. A. P., Zurn H. H., Bezerra U. H., and Almeida R. G. - Influence of the variable-speed wind generators in transient stability margin of the conventional generators integrated in electrical grids, *IEEE Transactions on Energy Conversion* **19** (4) (2004) 692–701.
6. Lima F. K. A., Luna A., Rodriguez P., Watanabe E. H., and Blaabjerg F. - Rotor voltage dynamics in the doubly-fed induction generator during grid faults, *IEEE Transactions on Power Electronics* **25** (1) (2010) 118–113.
7. Tsili M. and Papathanassiou S. - A review of grid code technical requirements for wind farms, *IET Renewable Power Generation* **3** (3) (2009) 308-332.

8. Akhmatov V. - Analysis of dynamic behavior of electric power systems with large amount of wind power, Ph.D. dissertation, Department of Electrical Power Engineering, Technical University of Denmark, Kongens Lyngby, Denmark, 2003.
9. Abbey C. and Joos G. - Supercapacitor energy storage for wind energy applications, IEEE Transactions on Industry Applications **43** (3) (2007) 769-776.
10. Nguyen T. H. and Lee D.-C. - Improved LVRT capacity and power smoothing of DFIG wind turbine systems, Journal of Power Electronics **11** (4) (2011) 568-575.
11. Van T. L. and Ho V. C. - Enhanced fault ride-through capability of DFIG wind turbine systems considering grid-side converter as STATCOM, Lecture Notes in Electrical Engineering (2015) 185-196.
12. Nielsen J. G. and Blaabjerg F. - A detailed comparison of system topologies for dynamic voltage restorers, IEEE Transactions on Industry Applications **41** (5) (2005) 1272-1280.
13. Wessels C., Gebhardt F., and Fuchs F.W. - Fault ride-through of a DFIG wind turbine using a dynamic voltage restorer during symmetrical and asymmetrical grid faults, IEEE Transactions Power Electronics **26** (3) (2011) 807-815.
14. Kim K.-H., Van T. L., Lee D.-C., Song S.-H., and Kim E.-H. - Maximum output power tracking control in variable-speed wind turbine systems considering rotor inertial power, IEEE Transactions on Industrial Electronics **60** (8) (2013) 3207-3217.

## ABSTRACT

### OVERVIEW OF LOW-VOLTAGE RIDE-THROUGH SOLUTIONS FOR DFIG WIND TURBINE SYSTEM

Van Tan Luong\*, Nguyen Thi Thanh Truc, Tran Hoan  
*Ho Chi Minh City University of Food Industry*

\*Email: [luonghepc@gmail.com](mailto:luonghepc@gmail.com)

Doubly-fed induction generator wind turbines are very sensitive to grid disturbances, especially to voltage dips, since they are connected directly to the grid. The ability of a wind turbine to survive a short voltage dip without tripping is referred to as the low-voltage ride-through (LVRT) capability. Crowbar, dynamic voltage restorer (DVR) and energy storage system (ESS) are the solutions which are adopted in this study. In order to test the LVRT capability of the wind turbine system, the PSCAD/EMTDC simulation has been performed for a 2 MW DFIG wind turbine system. In comparison of the LVRT techniques, although the ESS, with relatively high cost, outperforms the crowbar, the DVR system presents the best performances of the wind turbines through keeping the stator voltage at constant under grid fault condition despite the balanced and unbalanced voltage dips as well as normal condition.

*Keywords:* Crowbar, doubly-fed induction generator (DFIG), dynamic voltage restorer, energy storage system, voltage sag.