

MÔ HÌNH RÚT GỌN VÀ MÔ PHỎNG BTB-VSC-BESS ĐÁP ỨNG QUÁN TÍNH ẢO VÀ MÁY PHÁT ĐỒNG BỘ ẢO TRONG LƯỚI ĐIỆN YẾU

Bui Quốc Hùng, Ngô Minh Đức, Lê Tiên Phong, Ngô Đức Minh

Tóm tắt

Sự gia tăng nhanh của các nguồn điện nối lưới qua bộ biến đổi công suất làm giảm quán tính tự nhiên của hệ thống điện, đặc biệt tại các khu vực lưới yếu có tỷ lệ nguồn inverter cao. Bài báo này đề xuất một khung mô hình rút gọn cho thiết bị **BTB-VSC-BESS** nhằm đánh giá khả năng hỗ trợ tần số, điện áp và quán tính ảo thông qua điều khiển **Virtual Inertia (VI)** và **Virtual Synchronous Generator (VSG)**. Hệ thống nghiên cứu gồm hai lưới AC liên kết qua bộ biến đổi nguồn áp back-to-back, trong đó Grid 1 được xem là lưới mạnh, Grid 2 là lưới yếu hoặc khu vực phụ tải nhạy cảm. VSC1 vận hành theo chế độ Grid-Following để điều khiển công suất trao đổi, trong khi VSC2 vận hành theo hướng Grid-Forming/VSG. BESS nối vào DC-link cung cấp công suất tác dụng nhanh khi xảy ra nhiễu loạn tải. Mô hình động học rút gọn được xây dựng để mô phỏng đồng thời đáp ứng tần số, RoCoF, điện áp, công suất hỗ trợ, SOC của BESS và điện áp DC-link. Ba trường hợp được so sánh: không có FACTS-BESS, BTB-VSC Grid-Following và BTB-VSC-BESS VI/VSG. Kết quả cho thấy cấu hình BTB-VSC-BESS VI/VSG cải thiện điểm cực tiểu tần số từ 49,4759 Hz lên 49,7274 Hz, cải thiện điện áp cực tiểu từ 0,9101 pu lên 0,9660 pu, trong khi SOC chỉ giảm từ 60,0000% xuống 59,9086% trong kịch bản khảo sát. Kết quả chứng minh tiềm năng của FACTS thế hệ mới khi kết hợp với kho năng lượng và điều khiển tạo lưới trong hỗ trợ ổn định động của hệ thống điện hiện đại.

Từ khóa: *FACTS; BTB-VSC; BESS; quán tính ảo; VSG; Grid-Forming; lưới yếu; ổn định tần số; điện áp DC-link.*

1. Giới thiệu

Các thiết bị FACTS truyền thống được phát triển nhằm điều khiển điện áp, công suất phản kháng, tổng trở đường dây và dòng công suất trong hệ thống điện xoay chiều. SVC và STATCOM thường được dùng để điều khiển điện áp; TCSC và SSSC tác động vào tổng trở hoặc điện áp nối tiếp; UPFC và IPFC mở rộng khả năng điều khiển đồng thời nhiều đại lượng của lưới AC. Tuy nhiên, khi hệ thống điện chuyển nhanh sang cấu trúc có tỷ lệ nguồn điện tử công suất cao, yêu cầu đối với FACTS không chỉ dừng ở điều khiển trạng thái xác lập, mà mở rộng sang hỗ trợ động học hệ thống.

Trong hệ thống điện truyền thống, máy phát đồng bộ đóng góp quán tính tự nhiên thông qua năng lượng động học của rôto. Khi xảy ra mất cân bằng công suất, quán tính này làm giảm tốc độ thay đổi tần số và tạo thêm thời gian cho các tầng điều khiển sơ cấp, thứ cấp và bảo vệ tác động. Ngược lại, các nguồn điện mặt trời, điện gió, BESS và HVDC-VSC thường nối lưới qua inverter. Nếu vận hành theo chế độ Grid-Following, chúng chủ yếu bám theo điện áp/tần số của lưới hiện hữu và điều khiển dòng bơm vào lưới. Do đó, trong lưới yếu hoặc hệ thống thiếu nguồn đồng bộ, tần số có thể suy giảm nhanh hơn sau nhiễu loạn, còn điện áp có thể kém ổn định hơn.

Một hướng phát triển quan trọng là tích hợp kho năng lượng và điều khiển động học cho các thiết bị VSC, để chúng có thể đóng góp công suất tác dụng nhanh, tạo quán tính ảo và mô phỏng hành vi của máy phát đồng bộ. Trong nhóm công nghệ này, BTB-VSC-BESS là cấu hình đáng chú ý vì nó kết hợp được ba chức năng: liên kết hai hệ thống AC, điều khiển công suất qua DC-link và sử dụng BESS để hỗ trợ tần số/điện áp.

Bài báo này tập trung vào câu hỏi nghiên cứu sau:

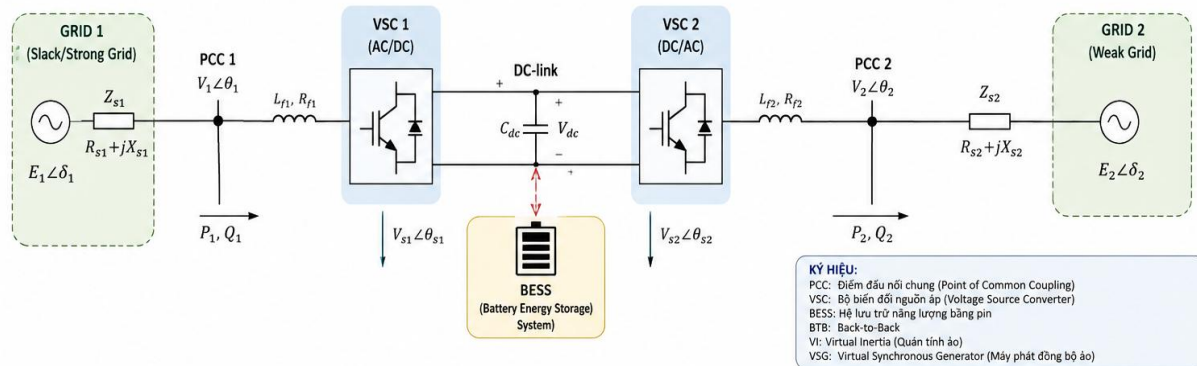
BTB-VSC-BESS, khi vận hành với điều khiển VI/VSG, có thể cải thiện đáp ứng tần số và điện áp của lưới yếu như thế nào so với trường hợp không có FACTS-BESS và trường hợp BTB-VSC Grid-Following?

Các đóng góp chính của bài báo gồm:

- 1) Xây dựng mô hình rút gọn cho hệ thống BTB-VSC-BESS phục vụ nghiên cứu đáp ứng tần số, điện áp, DC-link và SOC.
- 2) Đề xuất cấu trúc điều khiển kết hợp droop, quán tính ảo và VSG cho VSC phía lưới yếu.
- 3) Thiết lập kịch bản mô phỏng điển hình để so sánh ba trường hợp vận hành.
- 4) Đánh giá định lượng các chỉ tiêu f_{min} , RoCoF, V_{min} , công suất hỗ trợ cực đại, SOC cuối và điện áp DC-link.

2. Cấu trúc hệ thống BTB-VSC-BESS

Hệ thống nghiên cứu gồm hai lưới AC được liên kết qua bộ biến đổi nguồn áp back-to-back có BESS nối vào DC-link. Cấu trúc chức năng được mô tả trên Hình 1.



Hình 1. Cấu trúc hệ thống BTB-VSC-BESS đáp ứng VI/VSG.

Trong cấu hình này, **Grid 1** đại diện cho hệ thống AC mạnh hoặc vùng nguồn có khả năng cấp/hấp thụ công suất. **Grid 2** đại diện cho lưới yếu, khu công nghiệp, microgrid hoặc khu vực có tỷ lệ nguồn inverter cao. VSC1 nối với Grid 1 và vận hành ở chế độ Grid-Following, tức bám theo điện áp lưới và điều khiển công suất trao đổi. VSC2 nối với Grid 2 và vận hành theo chế độ Grid-Forming/VSG, tức tạo điện áp/tần số tham chiếu nội bộ và hỗ trợ ổn định cho lưới yếu.

BESS được nối vào DC-link thông qua bộ DC/DC hai chiều. Khi tần số Grid 2 suy giảm, BESS phát công suất tác dụng nhanh vào DC-link để hỗ trợ VSC2 bơm công suất vào lưới yếu. Khi tần số tăng hoặc có dư thừa công suất, BESS có thể hấp thụ công suất để sạc lại. Nhờ đó, thiết bị không chỉ điều khiển dòng công suất giữa hai lưới, mà còn tham gia động học tần số và điện áp.

3. Mô hình toán rút gọn

3.1. Động học tần số của Grid 2

Đáp ứng tần số của Grid 2 được mô tả bằng phương trình dao động công suất rút gọn:

$$2H_{grid} \frac{d\Delta\omega}{dt} = \Delta P_g + P_{FACTS} - \Delta P_L - D_{grid}\Delta\omega$$

trong đó $\Delta\omega = (f - f_0)/f_0$ là sai lệch tốc độ pu; H_{grid} là quán tính tương đương của Grid 2; D_{grid} là hệ số tắt dần tự nhiên; ΔP_g là công suất điều tốc tương đương của phần nguồn truyền thống; P_{FACTS} là công suất hỗ trợ từ BTB-VSC hoặc BTB-VSC-BESS; ΔP_L là nhiễu loạn công suất tải.

Bộ điều tốc tương đương được mô tả gần đúng bởi:

$$\frac{d\Delta P_g}{dt} = \frac{-K_g\Delta\omega - \Delta P_g}{T_g}$$

Mô hình này không nhằm thay thế mô hình máy phát chi tiết, mà dùng để phản ánh ảnh hưởng tổng hợp của quán tính, tắt dần và điều tốc sơ cấp trong lưới yếu.

3.2. Điều khiển Grid-Following của BTB-VSC

Trong trường hợp BTB-VSC chỉ vận hành Grid-Following, công suất hỗ trợ được tạo theo đặc tính droop chậm:

$$P_{GFL}^* = -K_{GFL}\Delta\omega$$

với giới hạn:

$$|P_{GFL}^*| \leq P_{GFL}^{max}$$

Do không có BESS, công suất hỗ trợ chủ yếu được trao đổi từ Grid 1 qua liên kết BTB. Điều này vẫn giúp cải thiện tần số và điện áp tại Grid 2, nhưng đáp ứng bị giới hạn bởi động học điều khiển và khả năng trao đổi công suất giữa hai lưới.

3.3. Điều khiển quán tính ảo VI

Khi có BESS, công suất hỗ trợ được bổ sung thêm thành phần quán tính ảo:

$$P_{VI}^* = -K_{VI} \frac{d\Delta\omega}{dt}$$

Kết hợp droop và quán tính ảo:

$$P_{BESS}^* = -K_f\Delta\omega - K_{VI} \frac{d\Delta\omega}{dt}$$

Khi tần số giảm nhanh, $d\Delta\omega/dt < 0$, lệnh P_{BESS}^* có giá trị dương. Khi đó BESS xả công suất vào DC-link, giúp VSC phía Grid 2 tăng công suất phát ra lưới và làm chậm quá trình suy giảm tần số.

3.4. Mô hình VSG

VSG mô phỏng hành vi động học của máy phát đồng bộ bằng cách tạo tốc độ góc và góc pha nội bộ. Dạng rút gọn của phương trình VSG là:

$$2H_{vsg} \frac{d\omega_{vsg}}{dt} = P_m^* - P_e - D_{vsg}(\omega_{vsg} - \omega_0)$$

Góc pha nội bộ được xác định bởi:

$$\frac{d\theta_{vsg}}{dt} = \omega_{vsg}$$

Trong mô hình rút gọn của bài báo, trạng thái ω_{vsg} và θ_{vsg} được dùng để minh họa khác biệt bản chất giữa GFL và VSG: GFL chủ yếu điều khiển dòng theo lưới có sẵn, trong khi VSG tạo trạng thái nội bộ giống nguồn áp có quán tính và tắt dần ảo.

3.5. Hỗ trợ điện áp và công suất phản kháng

Điện áp Grid 2 được mô tả bằng mô hình bậc một:

$$T_V \frac{dV}{dt} = V_0 - V - k_{VP}\Delta P_L + k_Q Q_{VSC}$$

Bộ biến đổi hỗ trợ điện áp thông qua đặc tính $Q - V$:

$$Q_{VSC}^* = K_V(V^* - V)$$

Cách mô hình hóa này cho phép đánh giá định tính tác dụng bù phản kháng của VSC đối với điện áp lưới yếu.

3.6. DC-link và SOC của BESS

Điện áp DC-link được mô tả bằng mô hình bậc một:

$$T_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = -(V_{dc} - 1) + k_{dc}(P_{BESS} - P_{FACTS})$$

Trạng thái sạc của BESS được tính gần đúng theo:

$$\frac{dSOC}{dt} = -\frac{P_{BESS} S_{base}}{E_{BESS} \cdot 3600} \cdot 100$$

Trong đó SOC tính theo phần trăm; P_{BESS} tính theo pu; S_{base} tính theo MW; E_{BESS} tính theo MWh. Phương trình này giúp kiểm tra mức tiêu hao năng lượng khi BESS tham gia hỗ trợ quán tính ảo.

4. Thông số mô phỏng và kịch bản khảo sát

Mô hình được xây dựng trên cơ sở công suất $S_{base} = 1000$ MVA và tần số định mức $f_0 = 50$ Hz. Các thông số chính được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số chính của mô hình mô phỏng

| Nhóm thông số | Ký hiệu | Giá trị | Ghi chú |
|------------------------------|------------------|----------|--------------------------------------|
| Công suất cơ sở | S_{base} | 1000 MVA | Quy đổi công suất pu |
| Tần số định mức | f_0 | 50 Hz | Hệ thống 50 Hz |
| Quán tính tương đương Grid 2 | H_{grid} | 2,0 s | Lưới yếu, tỷ lệ inverter cao |
| Hệ số tắt dần tự nhiên | D_{grid} | 14 | Tải và điều khiển sơ cấp tương đương |
| Công suất BESS định mức | P_{BESS}^{max} | 300 MW | Giới hạn hỗ trợ |
| Dung lượng BESS | E_{BESS} | 200 MWh | Dung tính SOC |
| SOC ban đầu | SOC_0 | 60% | Trạng thái sạc ban đầu |
| Giới hạn hỗ trợ GFL | P_{GFL}^{max} | 120 MW | BTB-VSC không BESS |
| Hệ số droop VI/VSG | K_f | 18 | Tác động theo lệch tần số |
| Hệ số quán tính ảo | K_{VI} | 0,85 | Tác động theo RoCoF |
| Hằng số đáp ứng VI | T_{VI} | 0,04 s | Đáp ứng nhanh của BESS |
| Hằng số đáp ứng GFL | T_{GFL} | 0,35 s | Đáp ứng chậm hơn VI/VSG |
| Hằng số DC-link | T_{dc} | 0,08 s | Mô hình điện áp DC-link |

Kịch bản mô phỏng kéo dài 10 s. Tại $t = 1$ s, tải Grid 2 tăng 150 MW. Tại $t = 4$ s, thiếu hụt công suất tăng thêm lên 200 MW nhằm mô phỏng giảm nguồn tái tạo hoặc tăng tải bổ sung. Tại $t = 5$ s, nhiễu loạn thứ hai kết thúc và hệ thống trở về mức thiếu hụt 150 MW. Ba trường hợp được khảo sát gồm:

- 1) **Không FACTS-BESS:** Grid 2 chỉ dựa vào quán tính và điều tốc tương đương.
- 2) **BTB-VSC GFL:** BTB-VSC hỗ trợ công suất theo droop chậm và hỗ trợ điện áp thông qua $Q - V$.
- 3) **BTB-VSC-BESS VI/VSG:** BESS cung cấp công suất nhanh theo droop và quán tính ảo; VSC phía Grid 2 vận hành theo hướng VSG.

5. Mô hình mô phỏng trong MATLAB

Bộ mã MATLAB được xây dựng theo cấu trúc tách khối để người đọc có thể kiểm tra và thay đổi thông số dễ dàng. Các file chính gồm:

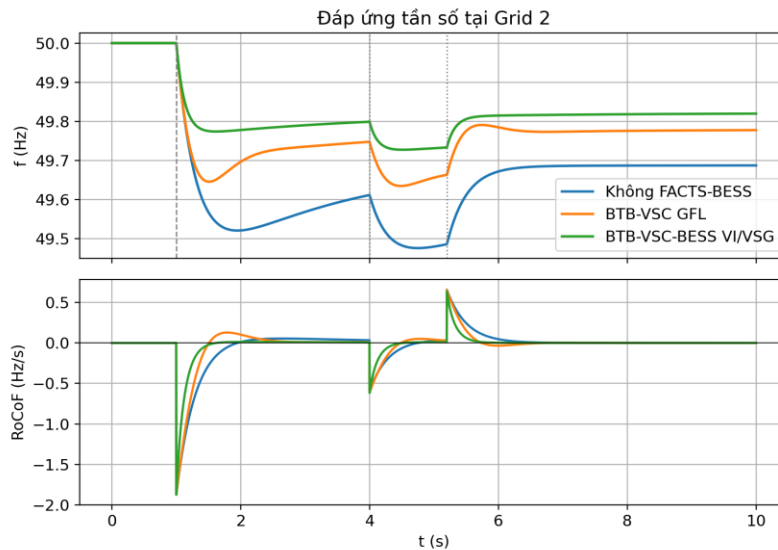
Bảng 2. Cấu trúc bộ mã MATLAB

| File | Chức năng |
|------|-----------|
|------|-----------|

| | |
|-----------------------------|----------------------------------|
| MAIN_FACTS_VI_VSG_BT_BESS.m | Chương trình chính |
| facts_vi_vsg_parameters.m | Khai báo thông số mô hình |
| facts_vi_vsg_simulate.m | Mô phỏng ba trường hợp |
| facts_vi_vsg_plot.m | Vẽ các hình kết quả |
| facts_vi_vsg_export.m | Xuất dữ liệu và bảng kết quả CSV |

6. Kết quả mô phỏng và thảo luận

6.1. Đáp ứng tần số và RoCoF

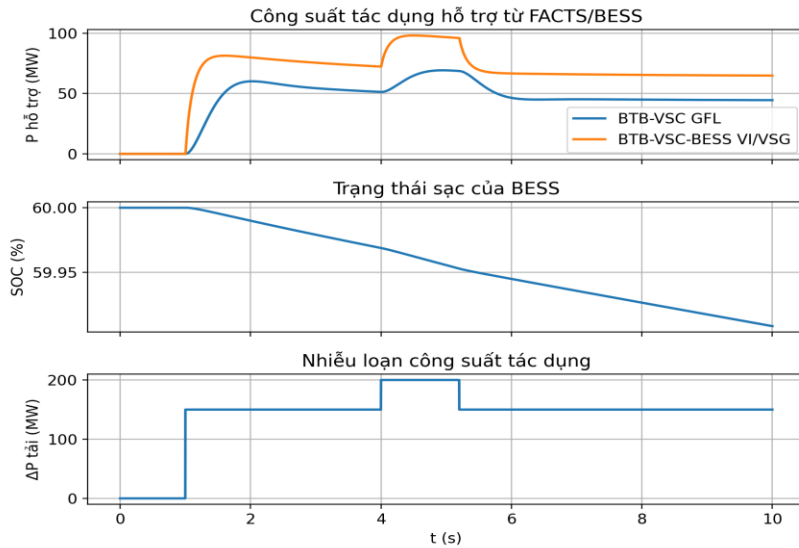


Hình 2. Đáp ứng tần số và RoCoF tại Grid 2.

Khi tải Grid 2 tăng tại $t = 1$ s, tần số giảm trong cả ba trường hợp. Trường hợp không có FACTS-BESS có điểm cực tiểu thấp nhất, đạt 49,4759 Hz. Khi bổ sung BTB-VSC ở chế độ GFL, tần số cực tiểu được cải thiện lên 49,6347 Hz. Trường hợp BTB-VSC-BESS với VI/VSG cho kết quả tốt nhất, đạt 49,7274 Hz.

Kết quả này cho thấy BESS và điều khiển quán tính ảo giúp giảm độ sâu suy giảm tần số. RoCoF cực tiểu ban đầu trong ba trường hợp gần như giống nhau do nhiễu loạn tải xuất hiện đột ngột và bộ điều khiển chưa thể tác động tại đúng thời điểm gián đoạn. Tuy nhiên, sau giai đoạn rất ngắn, VI/VSG tạo công suất tác dụng nhanh, làm chậm quá trình suy giảm tiếp theo và giúp tần số phục hồi ở mức cao hơn.

6.2. Công suất hỗ trợ và SOC của BESS

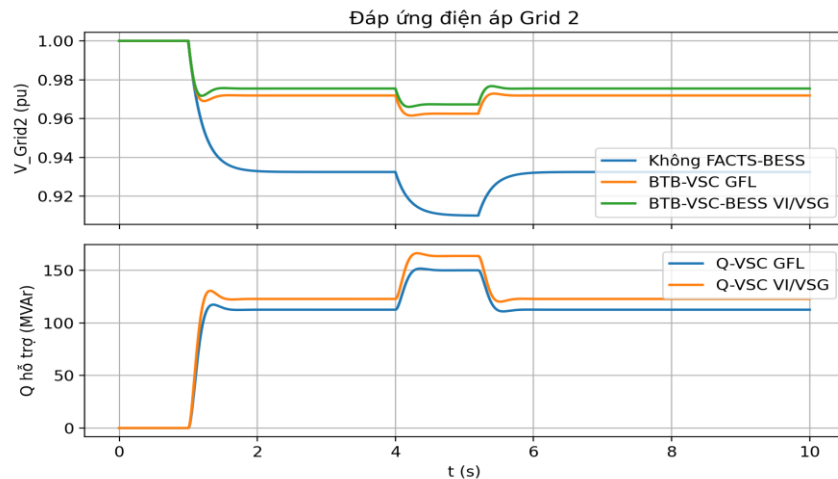


Hình 3. Công suất tác dụng hỗ trợ từ FACTS/BESS và SOC của BESS.

BTB-VSC ở chế độ GFL chỉ hỗ trợ công suất ở mức hạn chế, với công suất cực đại khoảng 69,28 MW trong kịch bản này. Khi sử dụng BTB-VSC-BESS với VI/VSG, BESS phát công suất nhanh hơn và lớn hơn, đạt gần 98,17 MW. Điều này giải thích vì sao đáp ứng tần số của trường hợp VI/VSG tốt hơn rõ rệt.

Do thời gian mô phỏng ngắn và dung lượng BESS là 200 MWh, SOC chỉ giảm rất nhỏ, từ 60,0000% xuống 59,9086%. Đây là đặc điểm có lợi của dịch vụ quán tính ảo: yêu cầu công suất lớn trong thời gian ngắn, nhưng năng lượng tiêu thụ không quá lớn nếu sự cố được không chế nhanh.

6.3. Đáp ứng điện áp và công suất phản kháng

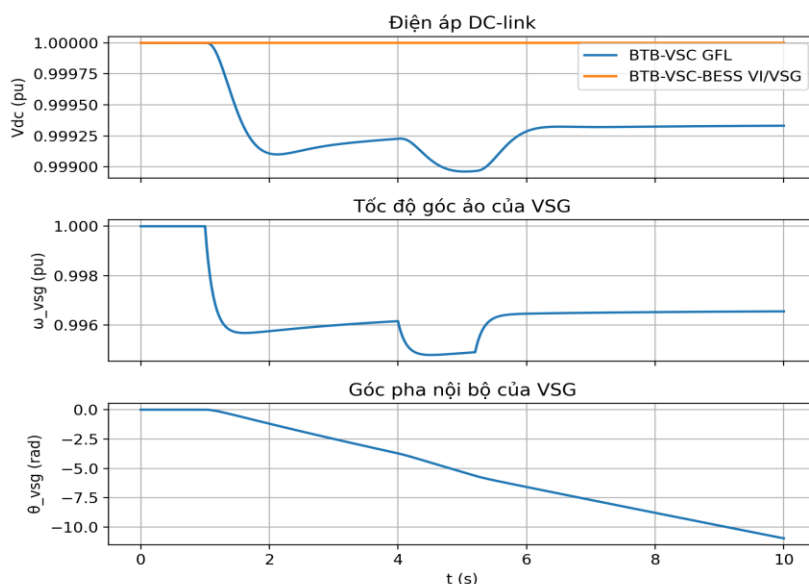


Hình 4. Điện áp Grid 2 và công suất phản kháng hỗ trợ.

Khi tải tăng, điện áp Grid 2 bị sụt do lưới yếu và thiếu công suất phản kháng tại chỗ. Trường hợp không có FACTS-BESS có điện áp cực tiểu khoảng 0,9101 pu. Khi dùng BTB-VSC ở chế độ GFL, điện áp cực tiểu được nâng lên 0,9615 pu. Trường hợp VI/VSG tiếp tục cải thiện lên 0,9660 pu.

Kết quả này cho thấy FACTS hiện đại không chỉ hỗ trợ tần số bằng công suất tác dụng, mà vẫn giữ được chức năng truyền thống là ổn định điện áp thông qua công suất phản kháng. Vai trò của VSC phía Grid 2 đặc biệt quan trọng vì nó có thể hỗ trợ điện áp nhanh tại PCC của lưới yếu.

6.4. Điện áp DC-link và trạng thái nội bộ VSG



Hình 5. Điện áp DC-link và các trạng thái nội bộ VSG.

Điện áp DC-link dao động rất nhỏ quanh giá trị định mức, cho thấy bộ điều khiển vẫn duy trì được cân bằng công suất giữa VSC và BESS. Trong trường hợp VI/VSG, tốc độ góc ảo và góc pha nội bộ thay đổi theo đáp ứng tần số và công suất hỗ trợ.

Đây là điểm khác biệt căn bản giữa điều khiển Grid-Following và VSG. GFL chủ yếu bơm dòng theo lưới có sẵn, trong khi VSG tạo ra trạng thái nội bộ giống máy phát đồng bộ, gồm tốc độ góc, góc pha và điện áp tham chiếu. Nhờ đó, bộ biến đổi có thể đóng góp đặc tính giống nguồn áp có quán tính và tắt dần ảo.

6.5. Bảng tổng hợp kết quả

Bảng 3. So sánh các trường hợp mô phỏng

| Trường hợp | f_{min} (Hz) | RoCoF nhỏ nhất (Hz/s) | V_{min} (pu) | $P_{FACTS,max}$ (MW) | SOC_{end} (%) |
|---------------------|----------------|-----------------------|----------------|----------------------|-----------------|
| Không FACTS-BESS | 49,4759 | -1,8750 | 0,9101 | 0,00 | 60,0000 |
| BTB-VSC GFL | 49,6347 | -1,8750 | 0,9615 | 69,28 | 60,0000 |
| BTB-VSC-BESS VI/VSG | 49,7274 | -1,8750 | 0,9660 | 98,17 | 59,9086 |

So với trường hợp không có FACTS-BESS, cấu hình BTB-VSC GFL cải thiện f_{min} thêm 0,1588 Hz và cải thiện V_{min} thêm 0,0514 pu. Cấu hình BTB-VSC-BESS VI/VSG cải thiện f_{min} thêm 0,2515 Hz và cải thiện V_{min} thêm 0,0559 pu. Như vậy, bổ sung BESS và điều khiển VI/VSG tạo ra lợi ích rõ rệt về tần số, đồng thời vẫn duy trì hỗ trợ điện áp.

7. Bàn luận

Kết quả mô phỏng cho thấy BTB-VSC-BESS có thể đóng vai trò như một thiết bị FACTS thế hệ mới. Khi chỉ sử dụng BTB-VSC ở chế độ GFL, thiết bị vẫn hỗ trợ được công suất và điện áp, nhưng khả năng phản ứng nhanh bị giới hạn. Khi bổ sung BESS và điều khiển VI/VSG, thiết

bị có thêm khả năng phát công suất tác dụng nhanh, làm giảm độ sâu suy giảm tần số và tăng khả năng phục hồi sau nhiễu loạn.

Về bản chất vật lý, lợi ích của VI/VSG đến từ hai yếu tố. Thứ nhất, BESS cung cấp năng lượng tác dụng trong khoảng thời gian ngắn, giúp giảm thiểu hụt công suất tức thời. Thứ hai, bộ điều khiển VSG tạo ra trạng thái nội bộ tương tự máy phát đồng bộ, giúp bộ biến đổi vận hành giống một nguồn áp có quán tính và tắt dần ảo. Sự phối hợp này giúp thiết bị điện tử công suất không chỉ là nguồn bơm dòng, mà trở thành phần tử tham gia ổn định động của hệ thống.

Tuy nhiên, cần nhấn mạnh rằng VI/VSG không phải khả năng vô hạn. Mức hỗ trợ phụ thuộc vào công suất định mức của VSC, dung lượng BESS, giới hạn dòng, điện áp DC-link và trạng thái SOC. Nếu BESS gần cạn năng lượng hoặc VSC chạm giới hạn dòng, bộ điều khiển phải giảm mức hỗ trợ để đảm bảo an toàn thiết bị.

8. Giới hạn của mô hình

Mô hình trong bài báo là mô hình rút gọn, phù hợp để phân tích xu hướng và kiểm chứng nguyên lý điều khiển. Mô hình chưa xét chi tiết:

- chuyển mạch van bán dẫn;
- điều khiển PWM;
- động học PLL phi tuyến;
- giới hạn dòng tức thời của VSC;
- bảo vệ DC-link;
- mô hình chi tiết của bộ DC/DC BESS;
- tương tác điện từ nhanh ở cấp EMT.

Vì vậy, các kết quả cần được hiểu là kết quả mô phỏng định hướng. Nghiên cứu tiếp theo nên mở rộng sang mô hình RMS/phasor chi tiết hoặc EMT/Simulink để kiểm tra thêm các giới hạn bảo vệ, điều khiển vòng trong và tương tác với lưới điện thực.

9. Kết luận

Bài báo đã xây dựng một khung mô hình rút gọn cho cấu hình BTB-VSC-BESS đáp ứng quán tính ảo và VSG trong lưới yếu. Ba trường hợp mô phỏng được so sánh gồm không FACTS-BESS, BTB-VSC Grid-Following và BTB-VSC-BESS VI/VSG.

Kết quả cho thấy BTB-VSC-BESS VI/VSG cải thiện rõ rệt đáp ứng tần số và điện áp. Trong kịch bản khảo sát, f_{min} tăng từ 49,4759 Hz lên 49,7274 Hz, V_{min} tăng từ 0,9101 pu lên 0,9660 pu, trong khi SOC chỉ giảm 0,0914 điểm phần trăm. Điều này chứng tỏ BESS có thể cung cấp công suất nhanh cho các dịch vụ quán tính ảo mà không tiêu hao quá nhiều năng lượng trong sự cố ngắn hạn.

Kết quả cũng cho thấy hướng phát triển mới của FACTS: từ các thiết bị bù phản kháng và điều khiển dòng công suất, FACTS có thể trở thành phần tử chủ động hỗ trợ tần số, điện áp, quán tính ảo và ổn định động khi kết hợp với kho năng lượng và điều khiển Grid-Forming/VSG.

Đối với hệ thống điện Việt Nam, cấu hình tương tự có thể được nghiên cứu cho các khu vực lưới yếu có nhiều điện mặt trời, điện gió, BESS, các liên kết BTB/HVDC-VSC và microgrid công nghiệp.

Tài liệu tham khảo

- [1] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. IEEE Press, 2000.
- [2] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, 1994.

- [3] A. Yazdani and R. Iravani, *Voltage-Sourced Converters in Power Systems: Modeling, Control, and Applications*. Wiley-IEEE Press, 2010.
- [4] Q.-C. Zhong and G. Weiss, "Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 4, pp. 1259-1267, 2011.
- [5] H.-P. Beck and R. Hesse, "Virtual synchronous machine," in *Proc. International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, 2007.
- [6] J. Driesen and K. Visscher, "Virtual synchronous generators," in *Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2008.
- [7] NREL, *Research Roadmap on Grid-Forming Inverters*. National Renewable Energy Laboratory, Technical Report NREL/TP-5D00-73476, 2020.
- [8] IEEE Power & Energy Society, *Grid Forming Inverters: A Critical Asset for the Power Grid*. Technical Report, 2020.
- [9] IEEE Std 1547-2018, *IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces*, 2018.
- [10] F. Blaabjerg, Y. Yang, D. Yang, and X. Wang, "Distributed power-generation systems and protection," *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 7, pp. 1311-1331, 2017.