

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.03.004

构网型 STATCOM/BESS 仿真建模及受扰特性

吕思卓¹, 郑超¹, 杨海超², 张兴宾², 宋瑞华¹

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 中国大唐集团科学技术研究院有限公司
火力发电技术研究院, 北京 100040)

摘要: 带蓄电池的静止同步补偿器(STATCOM/BESS)作为一种新型电力电子装备既可以参与系统频率调节,又可以提供动态无功电压支撑。首先介绍了构网型 STATCOM/BESS(GFM-S/B)的电路结构和工作原理,设计了基于虚拟同步控制的稳态控制策略和短路故障下的暂态控制策略,当发生故障时,将设备切换为限电流模式,可以在保证设备安全的前提下尽可能向系统提供无功支撑。在 PSCAD/EMTDC 环境下,建立了 GFM-S/B 并网系统仿真模型,并对系统的受扰特性进行分析,仿真结果表明 GFM-S/B 可以在电网电压波动时起到无功补偿的作用,增强对电网的弹性支撑能力。

关键词: 构网型控制; 静止同步补偿器; 虚拟同步控制; 控制策略; 受扰特性; 电压支撑

Simulation Model and Disturbed Characteristics of Grid-forming STATCOM/BESS

LYU Sizhuo¹, ZHENG Chao¹, YANG Haichao², ZHANG Xingbin², SONG Ruihua¹

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. Institute of Thermal Power Generation Technology, China Datang Corporation Science and Technological Research Institute, Beijing 100040, China)

Abstract: As a new type of power electronic equipment, static synchronous compensator with battery energy storage system(STATCOM/BESS) can not only participate in system frequency regulation, but also provide dynamic reactive power voltage support. Firstly, the circuit structure and working principle of the grid-forming STATCOM/BESS (GFM-S/B) are introduced. The transient control strategy based on virtual synchronous control and transient control strategy under short circuit fault are designed. In case of fault, the equipment can be switched to a current limiting mode to provide reactive power support for the system as much as possible on the premise of ensuring safety of the equipment. The GFM-S/B connection system is set up and disturbed characteristics of the system are analyzed under PSCAD/EMTDC platform. The simulation results show that GFM-S/B can play a role in reactive power compensation in the case of voltage fluctuation and can enhance the elastic support ability of power grid.

Keywords: grid-forming control; STATCOM; virtual synchronization control; control strategy; disturbed characteristics; voltage support

0 引言

在化石能源不断枯竭以及碳排放要求愈发苛刻的趋势下,以常规同步电源为主导的电力系统正逐步向风、光等非同步电源为主导的电力系统演变,这对电力系统的稳定运行提出了挑战^[1-3]。基于逆变器结构并网的新能源设备存在电压支撑能力弱的问题,尤其在特高压直流送端新能源汇集地

区,存在该类设备连锁脱网风险,因此提升新能源设备电压支撑能力对于保障新型电力系统可靠运行具有重要意义^[4-6]。

静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)作为近年来热门的无功补偿装置被应用于新能源汇集场站进行无功电压控制。针对 STATCOM 拓扑结构及其附加控制器的研究已取得一定的成果^[7-8]。文献[9]提出一种 LC 耦合式级联

收稿日期:2023-07-04

基金项目:中国大唐集团科学技术研究院有限公司火力发电技术研究院科技项目(XTB11202101118)。

STATCOM 拓扑结构,提高了级联 STATCOM 的容性无功补偿容量和运行效率。文献[10]提出一种基于静止无功发生器(SVG)与新能源发电单元的无功协调控制策略,提高了新能源场站的主动电压支撑能力。文献[11]介绍了 STATCOM 并联等效电阻抑制双馈风电场次同步谐振的机理,并设计了抑制次同步振荡的附加控制策略。但由于 STATCOM 只有无功 1 个自由度,无法综合考虑系统频率与电压协调控制。

随着储能技术的成熟,有学者提出在 STATCOM 的直流侧引入蓄电池系统(battery energy storage system, BESS),成为一种新的并联补偿装置^[12-13]。带蓄电池的静止同步补偿器(STATCOM/BESS)不仅可以快速补偿系统无功,还可以补偿有功电流,从而可以提供更加灵活多样的电能调节功能。文献[14]利用 STATCOM/BESS 为光伏并网点电压提供无功补偿,同时吸收不平衡有功功率提高光伏低电压穿越能力。但 STATCOM/BESS 还缺乏工程应用,原因一是现有电力系统主要依靠同步发电机进行负荷功率变化的调节,利用 STATCOM/BESS 参与一次调频的经济性较差,二是缺乏对其控制规律、故障特性及应用场景的系统性研究。构网型控制(grid forming)技术通过对逆变器控制系统改进,可以使新能源设备具备类似于同步发电机的调频、调压特性,从而解决高比例新能源电力系统缺乏支撑能力的问题^[15-18]。现有研究表明构网型控制适用于短路比较小的弱电网并网工况,如 P - f 下垂控制^[19-20]、虚拟同步机控制等^[21-22]。目前构网型控制在风电、光伏、微网等领域被广泛关注并达到应用^[23-24],鲜有研究将构网型控制策略引入 STATCOM/BESS,且针对

大扰动下的故障穿越控制策略需要进一步探索。

为了推动构网型控制技术的理论分析,实现更高电压等级的工程应用奠定基础,本文对基于虚拟同步控制策略的构网型 STATCOM/BESS(以下简称 GFM-S/B)装备进行了系统研究。首先对 GFM-S/B 的拓扑结构进行介绍,继而分别就正常稳态运行状态下,采用虚拟同步控制策略及故障状态下的切换控制策略进行详细分析,最后通过 PSCAD/EMTDC 建立了 GFM-S/B 并网系统的仿真模型,对正常运行时的稳态特性及断线和短路故障下的暂态特性进行分析。仿真结果验证了所提控制方法的正确性及有效性。

1 GFM-S/B 工作原理

GFM-S/B 主电路拓扑结构见图 1。包括换流器及 LC 滤波电路,其中换流器三相桥臂通过 Δ 接线方式接入电网,每个相间桥臂由 n 个单相 H 桥电路串联组成,每个 H 桥功率单元模块直流侧采用储能电池,LC 滤波电路包括滤波电抗器为和滤波电容,滤波电抗器接在每相变流器的首末端,电感值为 $0.5L_c$,滤波电容值为 C 。图中: $U_i \angle \delta$ 为 GFM-S/B 机端电压; $U_g \angle 0^\circ$ 为电网侧电压; P_c 、 Q_c 为 GFM-S/B 向系统输出的有功功率和无功功率。

GFM-S/B 可以等效为一个电压源,由文献[25]知,其输出的有功功率 P_c 和无功功率 Q_c 公式分别为

$$\begin{cases} P_c = \frac{3}{2} \left[\frac{R}{R^2 + X^2} (U_i^2 - U_i U_g \cos \delta) + \frac{X}{R^2 + X^2} U_i U_g \sin \delta \right] \\ Q_c = \frac{3}{2} \left[\frac{X}{R^2 + X^2} (U_i^2 - U_i U_g \cos \delta) - \frac{R}{R^2 + X^2} U_i U_g \sin \delta \right] \end{cases} \quad (1)$$

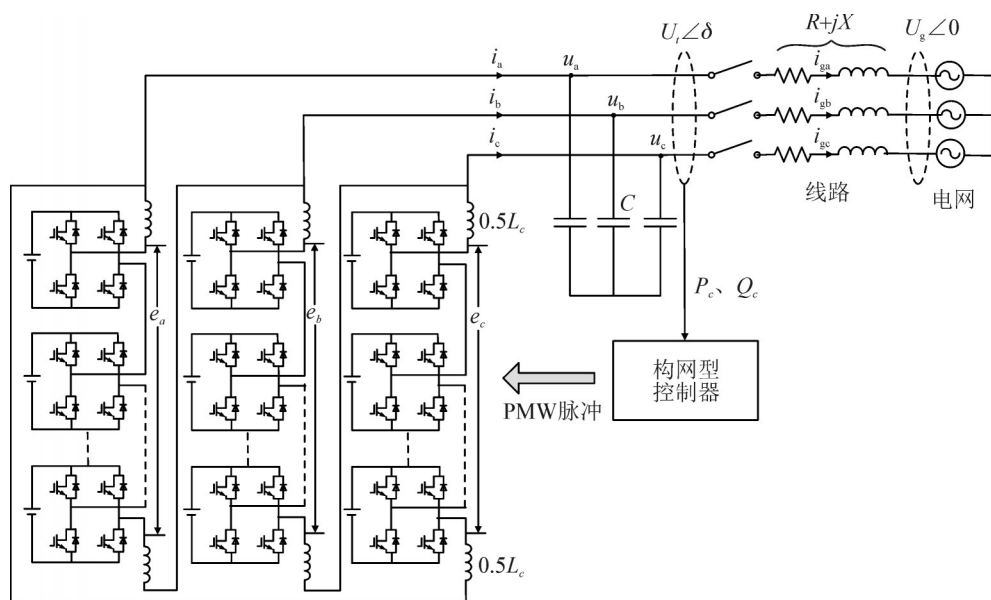


图1 GFM-S/B 拓扑结构
Fig. 1 Topological structure of GFM-S/B

通过控制 GFM-S/B 输出电压的幅值 U_t 和相角 δ , 可以调节向系统输出的有功功率和无功功率, 实现功率四象限运行。

2 GFM-S/B 控制策略

2.1 稳态控制策略

GFM-S/B 换流器的控制框图见图 2, 包括功率外环控制和电压电流内环控制。功率外环包括有功环和无功环, 如图 2(a) 所示, 有功环的输出作为换流器输出电压调制波的频率和相位, 无功环的输出作为换流器输出电压调制波的幅值。有功环模拟同步发电机转子运动方程, 实现 GFM-S/B 的惯量特性和有功功率-频率特性, 无功环模拟同步发电机的励磁系统, 实现一次调压特性, 有功环和无功环的公式为

$$J\omega_n \frac{d\omega}{dt} = P_{\text{set}} - P_c - D_p \omega_n (\omega - \omega_n) \quad (2)$$

$$\sqrt{2}K \frac{dE}{dt} = Q_{\text{set}} - Q_c - \sqrt{2}D_q (U_t - U_n) \quad (3)$$

式中, J 为虚拟惯量; D_q 为阻尼系数; D_q 为无功-电压下垂系数; K 为电压积分系数; ω 为输出角频率; U_n 、 ω_n 为额定电压和额定角频率; P_{set} 、 Q_{set} 为有功、无功参考值。

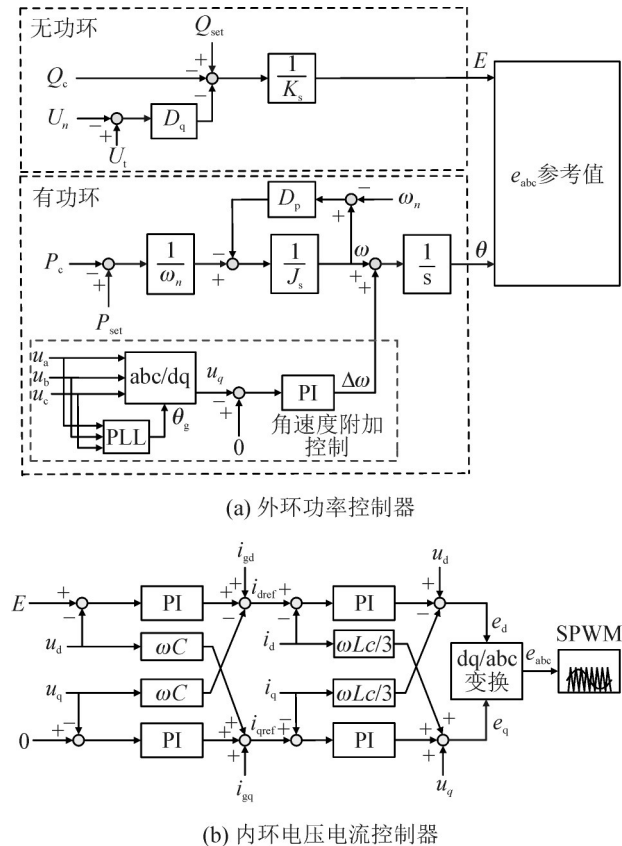


图2 换流器控制框图
Fig. 2 Control block diagram of GFM-S/B

为了提高控制精确性, 换流器内环控制器采用电压电流双闭环控制环节, 实现有功、无功解耦控制, 如图 2(b) 所示, 其中 e_{abc} 、 u_{abc} 、 i_{abc} 、 i_{gabc} 分别桥臂电压、并网电压、换流器电流和并网电流; e_{dq} 、 u_{dq} 、 i_{dq} 、 i_{gdq} 分别为桥臂电压、并网电压、换流器电流和并网电流的在 dq 轴坐标系下的分量。输入电压参考值向量设置为 d 轴方向, 即 $u_q=0$, $u_d=E$ 。输出信号通过载波移相 SPWM 调制驱动级联 H 桥电路。

2.2 故障穿越控制策略

当电网发生短路故障时电压大幅跌落, GFM-S/B 由于可以模拟同步发电机的恒电压源特性, 为了保持 GFM-S/B 出口电压恒定将会大幅增加流过换流器电流, 导致电力电子器件过流损毁。为此, 需设计故障下的控制策略, 使设备具备故障穿越能力。

检测到设备出口电压有效值降低至阈值 (0.85 p.u.) 以下时, GFM-S/B 切换控制模式。由虚拟同步控制切换为限电流控制模式后, 换流器坐标变换的同步信号由并网点电压经过锁相环 PLL 得到。为避免故障期间积分器偏差积累进入饱和状态, 功率外环采用抗饱和控制的积分器。限电流控制模式下优先向系统输出无功电流提供电压支撑, 电流参考值公式为

$$\begin{cases} i_{\text{qref}} = \min(K_f(U_n - U_t), i_{\text{max}}) \\ i_{\text{dref}} = \sqrt{i_{\text{max}}^2 - i_{\text{qref}}^2} \end{cases} \quad (4)$$

式中: i_{qref} 、 i_{dref} 分别为电流内环输入信号参考值; i_{max} 为换流器允许流过的电流最大幅值; K_f 为故障期间无功功率输出比例系数。GFM-S/B 在故障期间优先输出无功功率, 无功输出大小与电压跌落深度有关, 电压跌落幅值越大, 无功输出越多, 当 i_{qref} 达到电流限幅值 i_{max} 时保持恒定。

故障穿越期间输出功率见图 3。

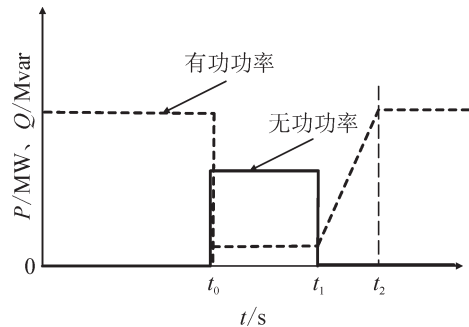


图3 故障穿越期间功率变化曲线
Fig. 3 Power variation curves during fault ride-through period

t_0 时刻发生短路故障, 内环控制器根据出口电压跌落幅值计算得到 i_{dref} 和 i_{qref} , 故障期间通过降低有功输出, 增大无功输出提高 GFM-S/B 对系统的暂

态电压支撑能力, t_1 时刻故障清除, 切换为虚拟同步控制, 无功功率输出降为零, 有功功率输出从故障期间的出力逐渐恢复, 在 t_2 时刻达到故障前的运行水平。

故障期间 GFM-S/B 输出电压相位由并网点电压经过锁相环 PLL 得到, 在故障结束切换回虚拟同步控制后, GFM-S/B 输出电压相位由有功环计算得到, 在控制切换瞬间两者存在相位差 $\Delta\theta$, 有功环通过调节换流器输出电压的角速度 ω 可以使二者保持一致, 但过渡过程会引起并网点频率波动。为加快频率恢复过程, 在换流器输出角速度 ω 加入附加信号 $\Delta\omega$, 使 GFM-S/B 输出电压相位快速追踪电网电压相位, 减小由于相位偏差引起的频率波动。其原理框图如 2(a)中最下面虚线框所示, 由于出口电压设置为 d 轴方向, 稳态时 GFM-S/B 出口电压 u_{abc} 在 dq 坐标系下的 q 轴分量 $u_q=0$, 故障清除后 u_q 的变化量经过 PI 环节与有功环计算得到的角速度相加, 输出新的角速度信号调整 GFM-S/B 频率。等到系统恢复平稳运行后, 退出角速度附加控制。

有功环增加角速度附加信号控制的效果见图 4。故障清除时会产生频率波动, 通过角速度附加控制后频率波动范围为 48.4 Hz ~ 51.6 Hz, 相比未采用附加控制频率波动幅度更小, 且恢复速度更快。

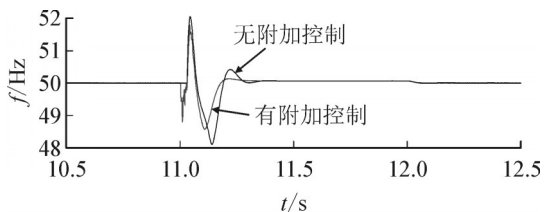


图4 附加角速度控制效果

Fig. 4 Effect of additional angular velocity control

3 GFM-S/B控制策略

3.1 仿真系统介绍

在电磁暂态仿真平台 PSCAD/EMTDC 中建立 GFM-S/B 并网系统, 系统结构见图 5。GFM-S/B 经过交流线路与电网相连, 线路 L_1 、 L_2 、 L_3 的阻抗均为 $2.5+j12.56 \Omega$, 接入电网为无穷大系统。设备主要参数见表 1。

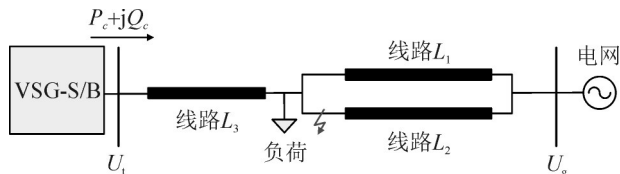


图5 GFM-S/B并网系统

Fig. 5 GFM-S/B grid connection system

表1 设备主要参数

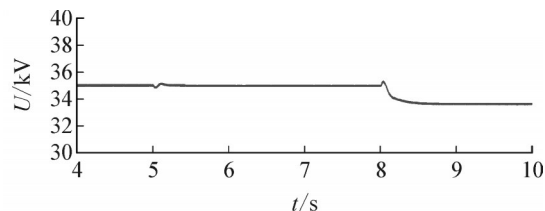
Table 1 Main parameters of equipment

参数	取值	参数	取值
并网额定电压 U_n/kV	35	阻尼系数 D_p	0.008
换流器容量 S_n/MVA	50	下垂系数 D_q	2
直流侧电压/kV	10	电压积分系数 K	1
每相 H 桥个数	6	滤波电抗器 L_c/mH	17.4
转动惯量 J	0.000 1	滤波电容 $C/\mu\text{F}$	40

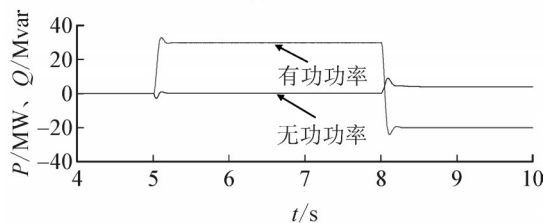
3.2 阶跃响应

3.2.1 有功阶跃

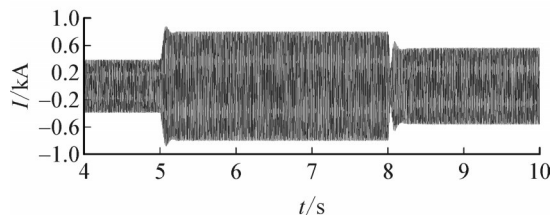
在稳态运行时进行功率阶跃响应测试, 初始运行状态下, GFM-S/B 向系统输出有功和无功均为零。将有功功率指令在 $t=5\text{ s}$ 时从 0 阶跃上升至 30 MW, 使之持续 3 s 之后, 将有功功率指令从 30 MW 下降到 -20 MW, 有功阶跃响应波形见图 6。



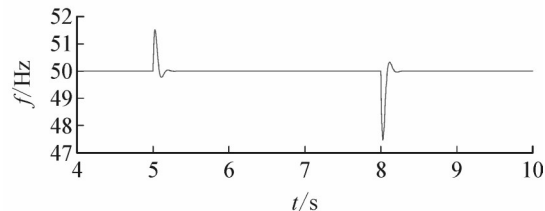
(a) 出口电压



(b) 有功功率和无功功率



(c) 换流器三相电流



(d) GFM-S/B 频率

图6 有功阶跃响应特性

Fig. 6 Active power step response characteristics

可以看出, 有功提升指令控制响应的上升时间为 70 ms, 峰值时间为 110 ms, 调整时间为 225 ms, 超调量为 9.3%, 有功控制器能够满足设备对功率快

速调节的需求。

根据电路理论,GFM-S/B 出口电压 U_t 为

$$U_t = \sqrt{\left(U_g + \frac{P_c R + Q_c X}{U_g} \right)^2 + \left(\frac{P_c X - Q_c R}{U_g} \right)^2} \quad (5)$$

由于无穷大系统电压 U_g 为恒定值,由式(5)可知有功功率输出由 30 MW 降低至-20 MW,引起出口电压 U_t 降低,GFM-S/B 无功-电压控制环节模拟通过发电机励磁调节系统,向系统输出 4 Mvar 无功功率抑制电压下降,最终 GFM-S/B 出口电压降低至 33.65 kV。

不同的 J 和 D_p 取值会影响有功功率指令的响应速度,考虑 $J=0.000\ 1$ 、 $D_p=0.008$; $J=0.0005$ 、 $D_p=0.008$; $J=0.000\ 1$ 、 $D_p=0.02$ 3 种情况, D_p 越大,控制响应时间越长, J 越大,功率控制超调量越大。

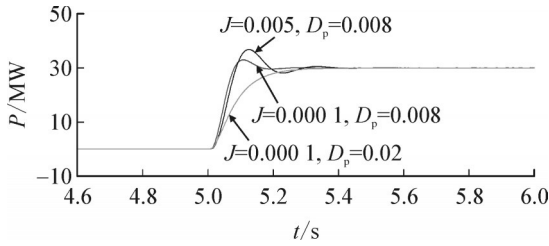


图7 不同参数取值对功率调节的影响
Fig. 7 Influence of different parameters on power regulation

3.2.2 无功阶跃

在 $t=5\text{ s}$ 无功指令从上升 0 到 15 Mvar,使之持续 3 s 之后,将功率指令从 15 Mvar 下降到-15 Mvar,无功阶跃下无功功率和电压变化情况见图 8。

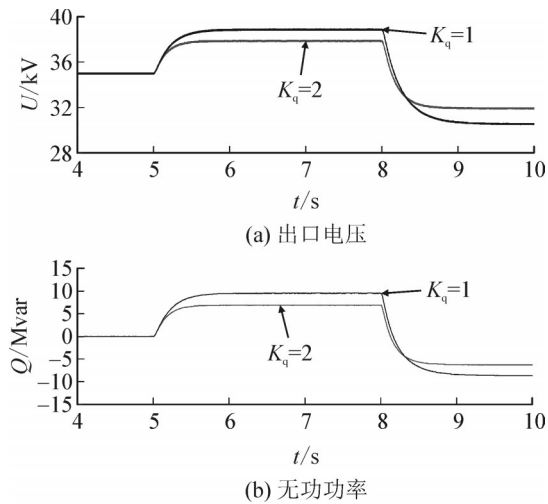


图8 无功阶跃响应特性
Fig. 8 Reactive power step response characteristics

GFM-S/B 外环无功-电压控制器包括无功和电压两个回路,二者可独立调节。当无功指令上升时,GFM-S/B 向系统发出容性无功功率,造成出口电压 U 增加。同时无功功率-电压控制环节一次调压作用下,其输出无功功率和端口电压呈下垂特

性,稳态下调节特性公式为

$$Q_c = Q_{\text{ref}} - K_q(U_t - U_n) \quad (6)$$

由式(6)可知出口电压 U_t 升高将导致无功功率输出低于无功功率指令值 15 Mvar。由不同下垂系数 K_q 下的无功阶跃响应可以看出, K_q 越大,相同电压幅值跌落对应的无功功率变化越大,最终 GFM-S/B 无功输出越小,抑制电压波动效果越强。

3.3 负荷变化

初始状态系统在 10 Mvar 感性负荷下运行,5 s 之后转接为 10 Mvar 的容性负荷。负荷变化下 GFM-S/B 暂态响应见图 9。图 9(a)为 GFM-S/B 输出 A 相电流和 A 相电压,在 5 s 之前的感性负荷下 GFM-S/B 输出电流超前于电压,补偿系统滞后的电流;当转为容性负荷后,输出滞后于电压的电流,从而补偿系统超前的电流,表明 GFM-S/B 可以很好的根据系统负荷的变化调整自身输出的电流。图 9(b)为 GFM-S/B 跟踪负载变化所输出的无功功率波形,在感性负载以及转为容性负载情况下均可以快速跟踪负荷变化,输出所需的无功功率维持电压恒定,调整时间小于 0.2 s,具有良好的动态特性,验证了 GFM-S/B 对无功功率较好的补偿效果。

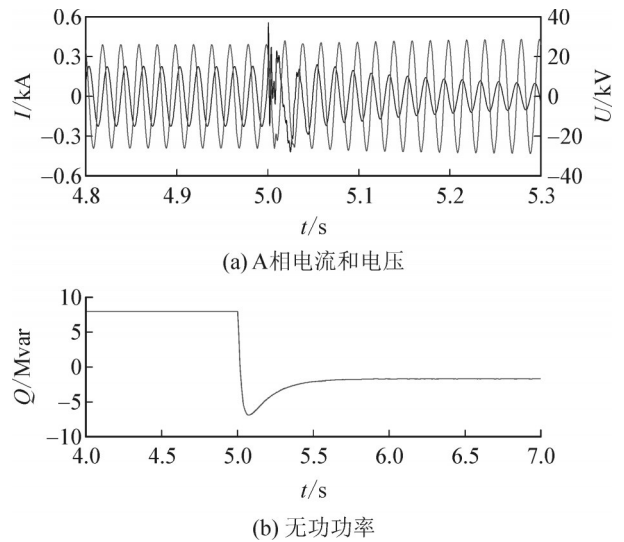


图9 负荷变化下GFM-S/B暂态响应
Fig. 9 Transient response of GFM-S/B under load variation

4 暂态运行特性分析

4.1 线路无故障开断

设置电网在 10 s 时 L_1 发生线路无故障开断,GFM-S/B 各电气量的仿真波形见图 10。可以看出,10 s 发生线路开断后,由于线路等效阻抗增大,线路无功损耗增加导致并网点电压降低,GFM-S/B 具备动态电压调节能力,向系统发出 4 Mvar 无功功率,

通过增大无功输出抑制电压降低,并网点电压降低1 kV。同时 GFM-S/B 有功功率输出保持恒定,流过换流器的电流未过载。

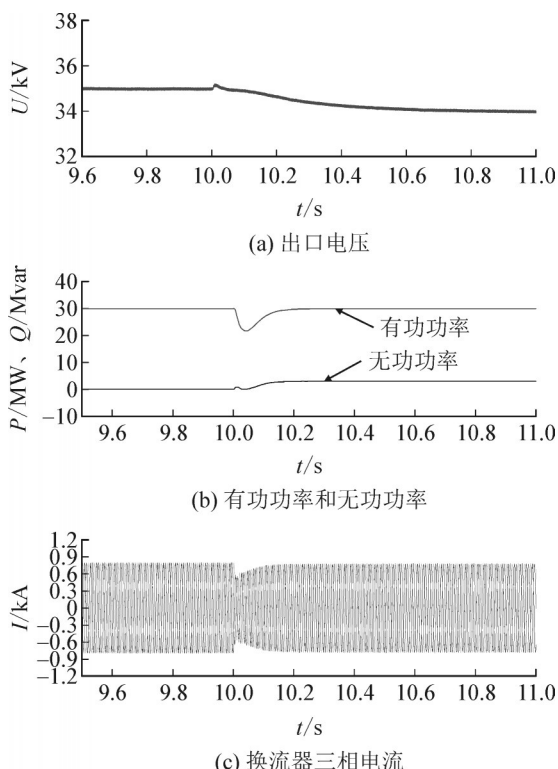


图10 线路开断下GFM-S/B暂态响应
Fig. 10 Transient response of GFM-S/B under circuit breaking

需要关注的是,线路开断后 GFM-S/B 与无穷大系统的等效电抗增大,当 GFM-S/B 向系统输出的有功功率超过静稳极限功率时,GFM-S/B 的虚拟功角 δ 将会失去同步稳定,有功功率发生过零振荡,如图 11 所示。为此,可通过增大 GFM-S/B 无功功率输出提升并网点电压,在一定范围内提升 GFM-S/B 的暂态稳定性,保障系统稳定运行。

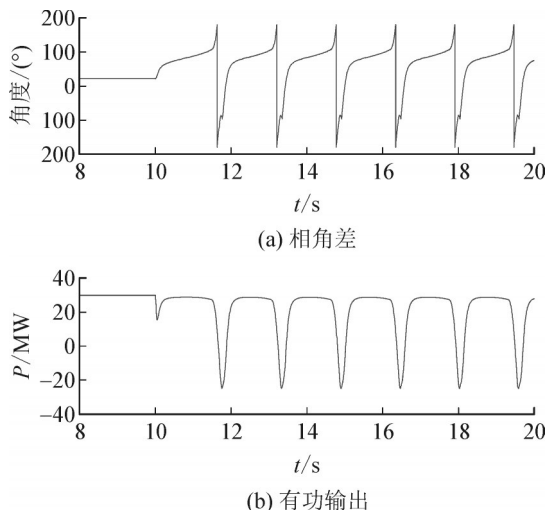


图11 线路开断后GFM-S/B暂态失稳情况
Fig. 11 Transient instability of GFM-S/B under circuit breaking

4.2 接地短路故障

为考察 GFM-S/B 在短路故障期间及恢复过程的暂态响应,设置图 5 中电网在 10 s 时发生三相接地短路故障,接地电阻为 $1\ \Omega$,持续时间为 1 s,构网型 SVG 各电气量的仿真波形见图 10。可以看出,10 s 发生故障后 GFM-S/B 快速检测到出口电压有效值降低至 0.85 p.u. 以下,控制模式由虚拟同步控制切换为限电流控制模式,换流器内环电流指令为 $i_{dref}=0, i_{qref}=-1.0\text{ kA}$,对应 GFM-S/B 有功输出为零,无功输出为 15 Mvar,通过增大故障期间无功输出为系统提供更多暂态电压支撑能力,同时故障期间流过换流器在电流被限制在 1.0 kA,不会造成设备的过流损坏。11 s 故障清除后,换流器检测到电压恢复至 0.85 p.u. 以上,切换为虚拟同步控制模式,由于故障期间同步信号由电网 PLL 提供,在切回外环虚拟同步控制瞬间电网相位会发生跳变,GFM-S/B 通过自身调节生成新的同步信号,有功功率从零逐渐恢复至故障前功率水平,换流器无明显暂态过电压冲击。

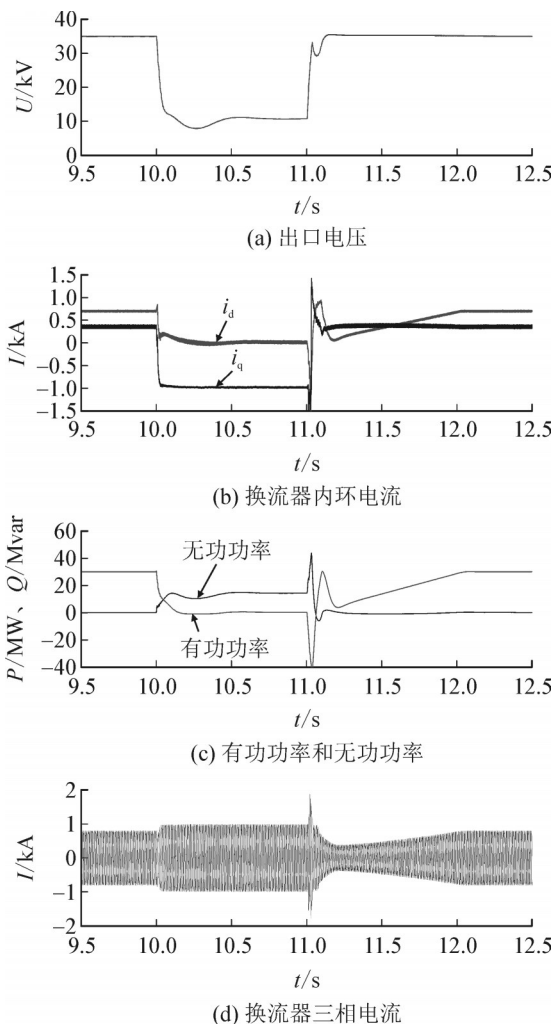


图12 短路故障下GFM-S/B暂态响应
Fig. 11 Transient response of GFM-S/B under short circuit fault

5 结语

本文设计了具备低电压穿越能力的 GFM-S/B 的拓扑结构及控制策略。在详细研究了稳态虚拟同步控制策略和故障下切换控制策略的基础上,通过在 PSCAD/EMTDC 中建立 GFM-S/B 仿真模型,对并网系统在正常运行时的稳态特性及不同类型故障下的暂态特性进行了仿真分析。

仿真结果表明,本文设计的稳态控制策略可以实现平滑地与系统交换有功功率和无功功率,同时阶跃响应速度快、超调量小;暂态控制策略可以实现虚拟同步控制和电流限幅两种控制方式的快速切换,实现故障期间的低电压穿越,且故障清除后设备无明显暂态过电压冲击。

参考文献

- [1] 邵文权,徐嘉鹏,卫晓辉,等. 采用PI+重复控制策略的配电网有源电流消弧方案[J]. 西安工程大学学报,2022,36(5):87-94.
SHAO Wenquan, XU Jiapeng, WEI Xiaohui, et al. An active current arc suppression scheme using PI and repetitive control strategy for distribution networks[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2022, 36(5): 87-94.
- [2] 粟世玮,张谦,熊炜,等. 含高渗透可再生能源的动态网络重构与无功电压调整协同优化[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(1): 100-110.
SU Shiwei, ZHANG Qian, XIONG Wei, et al. Coordination optimization of dynamic network reconfiguration and reactive power voltage regulation with high penetration renewable energy generation[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(1): 100-110.
- [3] 吴启亮,章雷其,赵波. 可再生能源制氢建模技术研究[J]. 浙江电力,2023,42(5):18-33.
WU Qiliang, ZHANG Leiqi, ZHAO Bo. A study of the modeling technology of Hydrogen production from renewable energy sources[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(5): 18-33.
- [4] 熊焰,李强泽,于玮,等. 促进可再生能源消纳的有序充电能量管理[J]. 电器与能效管理技术,2020(11):111-115.
XIONG Yan, LI Qiangze, YU Wei, et al. Orderly charge energy management to promote the consumption of renewable energy[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2020(11): 111-115.
- [5] 崔晓丹,吴家龙,王希,等. 适用于次同步振荡研究的直驱风电场等值建模[J]. 电网与清洁能源,2022,38(10):148-157.
CUI Xiaodan, WU Jialong, WANG Xi, et al. Equivalent modeling of direct drive wind farms for subsynchronous oscillation research[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(10): 148-157.
- [6] 罗天,汪可友,李国杰,等. 基于改进多馈入有效短路比的受端交直流混联电网 STATCOM 定容方法[J]. 电测与仪表,2022,59(2):133-140.
LUO Tian, WANG Keyou, LI Guojie, et al. STATCOM capacity-determine method based on modified multi-infeed effective short-circuit ratio in receiving-end AC/DC hybrid grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(2): 133-140.
- [7] 张智光,倪秋龙,廖培,等. 计及新能源消纳的地区电网无功电压优化控制策略[J]. 浙江电力,2023,42(1):46-53.
ZHANG Zhiguang, NI Qiulong, LIAO Pei, et al. An optimal reactive voltage control strategy for regional power grids considering new energy consumption[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(1): 46-53.
- [8] 和萍,申润杰,祁盼,等. 四种 FACTS 装置对改善风光互补系统稳定性的研究[J]. 智慧电力,2020,48(7):65-72.
HE Ping, SHEN Runjie, QI Pan, et al. Four kinds of FACTS devices to improve the stability of wind-solar complementary system[J]. Smart Power, 2020, 48(7): 65-72.
- [9] 成佳富,何志兴,周钦贤,等. LC 耦合式级联 STATCOM 及其控制策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(10):127-132.
CHENG Jiafu, HE Zhixing, ZHOU Qinxian, et al. LC coupled cascaded STATCOM and its control strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 127-132.
- [10] 包正楷,季亮,常潇,等. 不平衡电压跌落下新能源场站的主动电压支撑控制[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(16):161-169.
BAO Zhengkai, JI Liang, CHANG Xiao, et al. Active voltage support control strategy for a renewable generation farm during unbalanced voltage sags[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16): 161-169.
- [11] 曹建春,项祖涛,燕翠,等. 抑制双馈风电场次同步谐振的 STATCOM 研究[J]. 电网技术,2019,43(3):895-902.
CAO Jianchun, XIANG Zutao, YAN Hui, et al. Research on mitigating DFIG wind farm SSR with STATCOM[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 895-902.
- [12] 薛畅,王建赟,纪延超,等. 结合蓄电池储能系统的 STATCOM 的电流解耦控制[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(6):43-48.
XUE Chang, WANG Jianze, JI Yanchao, et al. Current decoupling control of STATCOM combined with battery energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 43-48.
- [13] 曹炜,韩雅帅,徐永海. 带蓄电池储能的级联多电平型

- STATCOM在风电场中的应用[J]. 大功率变流技术, 2015(4): 51-55.
- CAO Wei, HAN Yashuai, XU Yonghai. Applications of cascaded multilevel STATCOM combined with battery energy storage system in wind farm[J]. High Power Converter Technology, 2015(4): 51-55.
- [14] 程平凡, 曾成碧, 高选杰, 等. 基于STATCOM/ESS的光伏低压穿越控制策略[J]. 电测与仪表, 2019, 56(11): 108-114.
- CHENG Pingfan, ZENG Chengbi, GAO Xuanjie, et al. Control strategy of low voltage ride through capability of PV system based on STATCOM/ESS[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(11): 108-114.
- [15] 吕志鹏, 盛万兴, 钟庆昌, 等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2591-2603.
- LYU Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2591-2603.
- [16] 许诒翊, 刘威, 刘树, 等. 电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势[J]. 电网技术, 2022(9): 15-22.
- XU Jieyi, LIU Wei, LIU Shu, et al. Current state and development trends of power system converter grid-forming control technology[J]. Power System Technology, 2022(9): 15-22.
- [17] 王扬, 张靖, 何宇, 等. 虚拟同步发电机暂态稳定协同控制[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(12): 181-185.
- WANG Yang, ZHANG Jing, HE Yu, et al. Transient stability synergetic control of virtual synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12): 181-185.
- [18] 郑天文, 陈来军, 陈天一, 等. 虚拟同步发电机技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 165-175.
- ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, CHEN Tianyi, et al. Review and prospect of virtual synchronous generator technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 165-175.
- [19] DENG Yan, TAO Yong, CHEN Guipeng, et al. Enhanced power flow control for grid-connected droop-controlled inverters with improved stability[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7): 5919-5929.
- [20] 支娜, 张辉, 肖曦. 提高直流微电网动态特性的改进下垂控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(3): 31-39.
- ZHI Na, ZHANG Hui, XIAO Xi. Research on the improved droop control strategy for improving the dynamic characteristics of dc microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(3): 31-39.
- [21] DRIESEN J, VISSCHER K. Virtual synchronous generators [C]//2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh, PA, USA: IEEE, 2008: 1-3.
- [22] 吴恒, 阮新波, 杨东升, 等. 虚拟同步发电机功率环的建模与参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6508-6518.
- WU Heng, RUAN Xinbo, YANG Dongsheng, et al. Modeling of the power loop and parameter design of virtual synchronous generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6508-6518.
- [23] 张琛, 蔡旭, 李征. 具有自主电网同步与弱网稳定运行能力的双馈风电机组控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 476-485.
- ZHANG Chen, CAI Xu, LI Zheng. Control of DFIG-based wind turbines with the capability of automatic grid-synchronization and stable operation under weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 476-485.
- [24] 查雨欣, 林健, 王悦, 等. 基于广义下垂控制的光伏发电系统的惯量特性分析[J]. 智慧电力, 2021, 49(2): 54-59.
- ZHA Yuxin, LIN Jian, WANG Yue, et al. Analysis of inertia characteristics of photovoltaic power generation system based on generalized droop control[J]. Smart Power, 2021, 49(2): 54-59.
- [25] WU Heng, WANG Xiongfei. A mode-adaptive power-angle control method for transient stability enhancement of virtual synchronous generators[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1034-1049.

作者简介:

吕思卓(1989—),男,高级工程师,主要研究方向为电力系统稳定与控制。E-mail:hlvsizhuo@epri.sgcc.com.cn。

郑超(1977—),男,正高级工程师,主要研究方向为电力系统稳定与控制、电力电子技术。

杨海超(1981—),男,高级工程师,主要研究方向为电气一次设备试验及故障分析。

张兴滨(1984—),男,高级工程师,主要研究方向为电力系统继电保护及安全自动装置、电力系统分析。

宋瑞华(1971—),男,正高级工程师,主要研究方向为电力系统次同步振荡分析、电磁暂态仿真技术。