第 52 卷 第 5 期：2205-2212 高电压技术 Vol.52, No.5: 2205-2212
2026 年 5 月 31 日 High Voltage Engineering May 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250682

考虑最优相位投切的构网型 SVG 与电容器时序协同配合方法

马宏伟[1]，刘雨桐[1]，刘朋印[1]，糟伟红[2]，朱子民[2]
（1. 电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学)，济南 250061；
2. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院，乌鲁木齐 830000）

摘　要：构网型静止无功发生器(grid-forming static var generator, GFM-SVG)具有优异的暂态电压支撑能力，然而 GFM-SVG 在运行中会承担稳态无功支撑任务，调节容量的占用限制了其暂态电压支撑潜力的发挥。为充分释放 GFM-SVG 暂态电压支撑潜力，有必要构建 GFM-SVG 与电容器等静态无功资源的协同配合机制，在稳态阶段由电容器承担无功支撑任务，降低 GFM-SVG 调节资源占用量。首先，该文考虑 GFM-SVG 无功-电压响应特性，基于小信号稳定性分析对无功控制环参数进行了整定；其次，构建动、静态无功源时序协同配合方法，实现电容器在稳态阶段的最大支撑能力与 GFM-SVG 在暂态阶段的快速调节协同；然后，提出以无功功率和电压扰动最小化为目标的最优相位投切策略，优化电容器的投切时刻；最后，通过电磁暂态仿真验证所提策略的有效性。仿真结果表明，该策略能够显著抑制协同配合过程中的无功功率与电压波动，充分释放 GFM-SVG 暂态支撑能力。
关键词：构网型静止无功发生器；参数整定；无功协同；最优相位；暂态支撑

GFM-SVG and Capacitor Timing Co-operation Method Considering Optimal Phase Throwing

MA Hongwei[1], LIU Yutong[1], LIU Pengyin[1], ZAO Weihong[2], ZHU Zimin[2]
(1. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education(Shandong University), Jinan 250061, China; 2. Electric Power Research Institute, State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830000, China)

Abstract：Although the grid-forming static var generator (GFM-SVG) possesses excellent transient voltage support capabilities, it is also responsible for steady-state reactive power support during actual operation, and the occupation of regulating capacity restricts the utilization of its transient voltage support potential. In order to fully exploit the transient voltage support potential of the GFM-SVG, a synergistic cooperation mechanism between the GFM-SVG and static reactive resources, such as capacitors, must be constructed, enabling capacitors to assume the reactive power support task during the steady-state phase and reducing the amount of regulating resources occupied by the GFM-SVG. First, the reactive power–voltage response characteristics of the GFM-SVG are considered, and the reactive power control loop parameters are tuned based on small-signal stability analysis. Second, a dynamic and static reactive power source timing synergistic cooperation method is constructed to maximize the support capability of capacitors during the steady-state phase and to achieve rapid regulation synergy of the GFM-SVG during the transient phase. Third, an optimal phase-switching strategy is proposed to minimize reactive power and voltage perturbations. Finally, the effectiveness of the proposed strategy is validated through electromagnetic transient simulations. The simulation results demonstrate that the strategy can be adopted to significantly suppress reactive power and voltage fluctuations, thereby fully exploiting the transient support capability of the GFM-SVG.
Key words：grid-forming static var generator; parameter setting; reactive power synergy; optimal phase; transient support

0　引言

随着新能源渗透率不断提升，电力系统呈现出低惯量、弱阻尼和强随机波动等动态特性[1]。故障发生后，暂态低电压与过电压问题交织，限制了新能源的接纳能力[2-4]。构网型静止无功发生器(grid-forming static var generator, GFM-SVG)基于控制环节自主建立电压幅值与相位，具备良好的暂态电压支撑能力，能够有效提高系统的短路容量与电

基金资助项目：国家自然科学基金企业创新发展联合基金(U22B20101)。
Project supported by National Science Foundation of China Joint Fund for Enterprise Innovation and Development(U22B20101).

压稳定裕度[5]。近年来，GFM-SVG 作为具备主动调节特性的动态无功支撑装置，已逐步进入工程示范应用阶段[6]。

GFM-SVG 在实际运行中，受其控制策略影响，即使在稳态工况下也会输出一定量的无功功率[7-8]，占用原本为暂态响应预留的动态容量，从而限制了 GFM-SVG 应对突发扰动时的快速无功调节能力。为此，需要与电网中已有的静态无功装置(如电容器)，实现稳态阶段的无功容量置换，以释放 GFM-SVG 在暂态阶段的支撑潜力。此外，为确保 GFM-SVG 在暂态过程中的调节性能，需基于其无功-电压响应特性，开展控制参数整定工作。在此基础上，进一步建立动、静态无功源的时序协同配合方法，以增强 GFM-SVG 暂态支撑能力。

目前已有研究对 GFM-SVG 无功控制环的参数整定问题进行探索。文献[9]通过计算无功控制环的特征根，通过仿真反复试凑得到优化参数，并指出在弱电网条件下引入电压调节环节具有重要意义。文献[10]证明了在参数设计中有功控制环与无功控制环可近似解耦，并据此设计了抑制两倍工频脉动的控制参数。文献[11]则引入改进粒子群优化算法，实现了无功控制参数的自适应调整，以适应电力系统运行状态的阶段性变化。然而上述研究主要聚焦于无功环的稳定性分析，尚未考虑无功-电压动态响应特性及其对暂态调节性能的影响。

近年来，针对动态-静态无功源电压支撑调控问题，已有研究主要可分为以下两方面：

1）从日前调度角度出发，协调动静态无功装置以优化日内无功资源配置。文献[12-13]从时序角度协同 SVG 和电容器运行，实现配电网日内无功优化，覆盖运行场景的无功-电压需求。文献[14]进一步考虑小时级的短时尺度调度策略，通过电压预测技术将运行点定位在接近额定电压水平，减少逆变器资源的长期占用，优先投入电容器以维持电压稳定。然而上述研究未充分分析电容器离散投切带来的电压波动问题。

2）从动静态无功装置时序配合角度出发，开展优化算法及策略设计研究。文献[15-16]引入算法建立了变流器与电容器的协同控制模型以降低电压偏差，但未明确提出适用于变流器的无功功率控制策略。文献[17]基于二阶锥松弛理论提出了分布式光伏与电容器协同优化方法，优化了静态无功装置与动态电源之间的运行协调关系；文献[18]基于动态聚类平滑算法给出动、静态无功补偿分组配置方法；但以上策略未验证是否能有效释放动态补偿装置的暂态支撑潜力。

总的来看，现有研究在针对 GFM-SVG 无功环参数整定的系统性建模，以及动、静态无功源协同运行过程中的暂态性能保障方面仍存在明显不足。

因此，本文围绕动态与静态无功补偿装置时序协同配合问题，从 GFM-SVG 无功控制参数整定与电容器置换策略优化两方面出发，提出一种动静态无功源协同控制框架。主要工作如下：

1）理论推导了 GFM-SVG 无功-电压小信号模型，并提出了改善无功-电压响应特性的控制参数整定方法。

2）构建了 GFM-SVG 与电容器的时序协同配合方法，在稳态运行阶段通过电容器投切释放 GFM-SVG 的暂态无功支撑能力，故障扰动期间快速调用其动态出力，形成动静互补的无功协同框架，充分释放暂态电压支撑潜力。

3）提出以无功功率波动与电压扰动最小化为目标的电容器最优相位投切策略，有效降低置换过程中引发的无功功率与电压波动。

1 GFM-SVG 无功控制环参数整定

1.1 GFM-SVG 控制原理

图 1 展示了 GFM-SVG 主电路拓扑及控制框图，其控制架构应包括有功-相位生成环、无功幅值产生环和电压电流内环控制。有功相位角生成环可通过虚拟同步机控制[19]，以生成内部电动势 E_{ref} 的相位/频率。无功幅值产生环可通过下垂控制实现内部 E_{ref} 的幅值生成。电压电流控制内环控制用于电流跟踪与过流保护，确保系统稳定运行。

GFM-SVG 可向电网提供惯量支撑，需模拟同步调相机的外特性[20]，其有功控制环通过模拟同步机的摆动方程实现相位发生：

$$P_{\mathrm{m}}-P_{\mathrm{e}}-D_{\mathrm{p}}\omega_{\mathrm{r}}=T_{\mathrm{j}}\frac{\mathrm{d}\omega_{\mathrm{r}}}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

式中：P_{m} 与 P_{e} 为 GFM-SVG 的机械功率与电磁功率；D_{p} 为阻尼系数；T_{j} 为虚拟同步惯性的时间常数；ω_{r} 为输出转速偏差标幺值。图 1(b)中 ω_0 为电网额定转速值；θ_{ref} 内部电动势 E_{ref} 的相位；δ 为变流器与外部电网之间相位差。

无功控制环通过模拟同步调相机电压调节特性，在无功下垂控制中附加了一次调压环节：

$$K_{\mathrm{v}}(U_{\mathrm{set}}-U_{\mathrm{e}})+Q_{\mathrm{set}}-Q_{\mathrm{e}}=\frac{1}{K_{\mathrm{i}}}\frac{\mathrm{d}E_{\mathrm{ref}}}{\mathrm{d}t} \tag{2}$$

式中：K_{v}为无功调压下垂系数；U_{set}和 U_{e}分别为并网点的参考电压和实际电网电压；Q_{set} 和 Q_{e} 为 GFM-SVG 设定的额定无功功率和瞬时无功功率；K_{i}为无功积分系数；E_{ref}为 GFM-SVG 的内电势。

GFM-SVG 可等效于含串联阻抗的受控电压源，电网扰动状态下的 GFM-SVG 的输出电流大小由滤波电感决定，导致扰动后产生过电流。增大滤波电感可提升过流耐受能力，但会导致成本增加[21]。需在内部电势控制环节中引入虚拟阻抗环，其等效输出阻抗为：

$$Z=R_{\mathrm{v}}+\mathrm{j}\omega_{\mathrm{m}}(L_{\mathrm{conv_G}}+L_{\mathrm{v}}) \tag{3}$$

式中：R_{v}与 L_{v}为虚拟出的电阻与电感；$L_{\mathrm{conv_G}}$为滤波器电感；ω_{m}为有功环生成的角频率，其中虚拟阻抗环节的数学模型为：

$$E_{\mathrm{ref}}=R_{\mathrm{v}}I_{\mathrm{ref}}+L_{\mathrm{v}}\frac{\mathrm{d}I_{\mathrm{ref}}}{\mathrm{d}t}+U_{\mathrm{e}} \tag{4}$$

式中：I_{ref}为控制环节生成的参考电流。电压电流闭环控制环节数学模型为：

$$U_{\mathrm{ref}}=L_{\mathrm{conv_G}}\frac{\mathrm{d}I_{\mathrm{ref}}}{\mathrm{d}t}+U_{\mathrm{e}} \tag{5}$$

式中：U_{ref}为 GFM-SVG 内部逆变器的参考电压。

1.2 无功-电压控制环参数整定方法

为提升 GFM-SVG 在电压扰动下的无功-电压响应特性，确保其输出响应满足暂态支撑需求，有必要对无功控制环中的关键参数进行整定。合理的参数设定不仅决定了无功调节的动态响应速率，也直接影响电压调节的稳态精度。

对于图 1(a)所示的并网拓扑，流过滤波电感的电流为：

$$\boldsymbol{I}=\frac{E_{\mathrm{ref}}\angle\delta-kU\angle0}{Z\angle\alpha} \tag{6}$$

式中：U 为外部电网幅值大小；k 为 GFM-SVG 侧变压器变比；α 为阻抗角，其大小为：

$$\alpha=\arctan(\frac{\omega_{\mathrm{m}}L_{\mathrm{v}}+\omega_{\mathrm{m}}L_{\mathrm{conv_G}}}{R_{\mathrm{v}}}) \tag{7}$$

由于实际 $\omega_{\mathrm{m}}L_{\mathrm{v}}+\omega_{\mathrm{m}}L_{\mathrm{conv_G}}\gg R_{\mathrm{v}}$，$\alpha$ 近似等于 90°。并网点实际输出有功功率与无功功率经计算可表示为：

$$Q_{\mathrm{e}}=\frac{kE_{\mathrm{ref}}U}{Z}\sin(\alpha-\delta)-\frac{(kU)^2}{Z}\sin\alpha \tag{8}$$

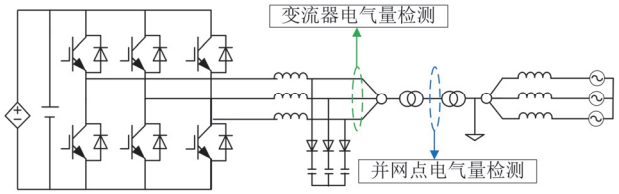
GFM-SVG 理想工作状态下输出无功功率可近似为：

$$Q_{\mathrm{e}}=\frac{kE_{\mathrm{ref}}U}{Z}\cos\delta-\frac{(kU)^2}{Z}\approx\frac{E_{\mathrm{ref}}U_{\mathrm{e}}}{Z}-\frac{U_{\mathrm{e}}^2}{Z} \tag{9}$$

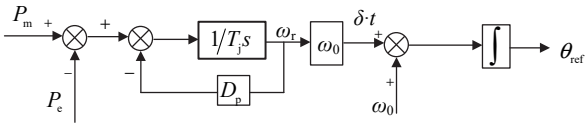
联系图 1(c)的无功环控制结构，可建立 GFM-SVG 如图 2 无功同步控制的小信号模型。考虑无功功率参考值与输出无功功率之间的响应特性，该环节可等效为一阶惯性系统，其传递函数为：

$$G_{\mathrm{Q}}(s)=\frac{Q_{\mathrm{e}}(s)}{Q_{\mathrm{m}}(s)}=\frac{1}{\frac{Z}{K_{\mathrm{i}}U_{\mathrm{e}}}s+1} \tag{10}$$

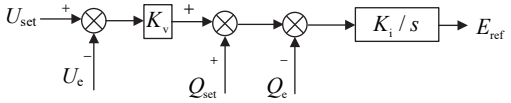
式中：$Z/(K_{\mathrm{i}}U_{\mathrm{e}})$为无功调节时间常数，时间常数越小，系统调节越快。根据控制理论，当一阶系统的单位阶跃响应误差带限制在±5%内时，其对应的响应时间可近似表示为：



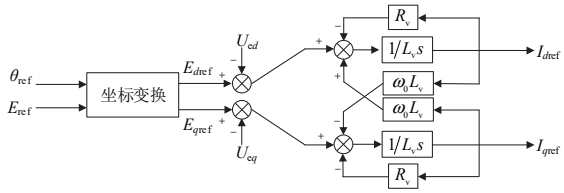
(a) GFM-SVG 主电路拓扑及并网配置



(b) 有功控制环



(c) 无功控制环



(d) 虚拟阻抗限流环

图 1 GFM-SVG 主电路拓扑及控制框图

Fig.1 GFM-SVG main circuit topology and control block diagram

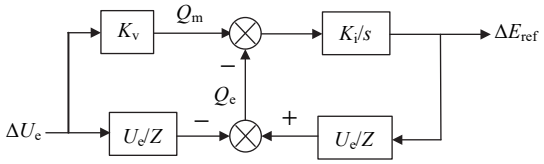


图 2 无功控制环小信号模型

Fig.2 Small signal model of reactive power synchronization control loop

$$t_{\mathrm{r}}=\frac{2.20Z}{K_{\mathrm{i}}U_{\mathrm{e}}} \tag{11}$$

依据国家标准[22]无功环响应时间 t_{r}≤50 ms，可由此确定积分系数。

无功调压下垂系数 K_{v} 表征当电压受到扰动时，GFM-SVG 发出无功随电网电压的变化率：

$$K_{\mathrm{v}}=\frac{\Delta Q}{\Delta U} \tag{12}$$

式中：ΔQ 为 GFM-SVG 无功功率变化标幺量；ΔU 为 GFM-SVG 电压变化标幺量。根据国标 K_{v} 宜在 12.5~33.3 之间，满足对电网的电压支撑。

2 动静态无功资源时序协同配合方法

为了充分释放 GFM-SVG 的暂态电压支撑能力，本文提出基于时序配合的无功功率置换策略，通过释放 GFM-SVG 的稳态无功输出，并以电容器分阶段投切实现动态容量的逐步置换。具体实施中，需确定 GFM-SVG 待释放的无功容量、置换周期及释放速率，构建其无功输出的减小策略，规划电容器的投切组数与时间间隔。

由于电容器投切后无功功率瞬时跃升，集中投切易引发电压越限风险，本文进一步提出以最小化系统无功功率波动与电压变化为目标的电容器最优相位投切策略，通过优化投切相位，降低每次投切对母线电压的扰动幅度。

2.1 GFM-SVG 无功置换容量与周期确定方法

设区域内 GFM-SVG 的待置换无功容量为 ΔQ_{dynm}，与拟投切电容器容量 ΔQ_{C} 的关系满足：

$$\Delta Q_{\mathrm{dynm}}=(N-n_{\mathrm{c}})Q_{\mathrm{C}} \tag{13}$$

$$\left|\Delta Q_{\mathrm{dynm}}-\Delta Q_{\mathrm{C}}\right|\le\Delta Q_{\mathrm{ref}} \tag{14}$$

式中：N 为区域内电容器总组数；n_{c} 为已投入电容器数目；Q_{C} 为单台电容器的无功容量；ΔQ_{ref} 为系统平衡无功功率。

$$U+(N-n_{\mathrm{c}})\cdot wQ_{\mathrm{C}}\le U_{\mathrm{ref}} \tag{15}$$

式中：w 为置换一组电容器对分区内电压的影响系数；U 为分区内电压中枢点的实际电压；U_{ref} 为系统平衡电压。在实际电网中，w 并非一个固定值，在给定的系统运行点，通过计算系统潮流，可以得到电网的雅可比矩阵。矩阵中电压幅值对无功功率注入的偏导数(即$\partial U/\partial Q$)，即为该点影响系数。对于一个具体的工程应用，可在典型运行方式下计算或实测此系数，来检验计算所得置换所需电容器数目是否合理。

协同控制开始时 GFM-SVG 可置换容量为 ΔQ_{dyn}，当 Q_{dyn}>ΔQ_{dyn} 时满足：

$$\Delta Q_{\mathrm{dyn}}=\Delta Q_{\mathrm{dynm}} \tag{16}$$

此时需要参与置换的电容器数目为 M=N−n_{c}。当 Q_{dyn}≤ΔQ_{dyn} 时满足：

$$\Delta Q_{\mathrm{dyn}}=Q_{\mathrm{dyn}} \tag{17}$$

此时需要参与置换的电容器数目为 M=ΔQ_{dyn}/Q_{C}。

GFM-SVG 在减小无功输出的过程中，其输出功率变化可近似为线性过程，定义动态无功变化速率 k_{Q} 为：

$$k_{\mathrm{Q}}=\frac{\Delta Q_{\mathrm{dyn}}}{T} \tag{18}$$

式中：T 为整个无功置换周期时间。

对于常规的电容器组自动投切装置而言，自发出投入指令起，直至电容器组完全接入电网，通常会存在 3~5 s 的延迟时间，记为 t_{delay}，投切时刻应考虑延迟时间的存在进行设置裕度时间，记为 t_{mar}。故阶段间内投入时间间隔 Δt_{pin} 一般设定超过 10 s，满足：

$$\Delta t_{\mathrm{pin}}\ge t_{\mathrm{delay}}+t_{\mathrm{mar}} \tag{19}$$

GFM-SVG 置换周期与参与执行的电容器数目有关，满足：

$$T\ge M\Delta t_{\mathrm{pin}} \tag{20}$$

2.2 降低无功电压波动的电容器最优相位投切方法

如图 3 所示，整个置换过程按照等幅度、分阶段、逐步投切的原则进行。在每一阶段，系统仅允许投入一组电容器，且要求在 GFM-SVG 已完成部分动态无功释放的前提下进行。此时，电容器输出功率与 GFM-SVG 下降功率基本平衡，可有效缓解无功功率的突变问题。

设定在 GFM-SVG 无功出力下降到某一值后投入第 i 组电容器，则该投切动作将叠加一个额外无

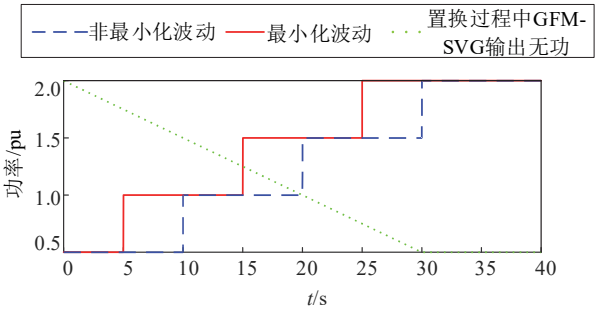


图 3 无功置换控制策略

Fig.3 Reactive power replacement control strategy

功脉冲，导致瞬时功率波动。考虑在任一电容器置换阶段，系统总无功功率以该阶段初始时刻的参考值 Q_{ref} 作为基准。在 GFM-SVG 无功出力以线性规律持续下降的过程中，系统总无功功率将相对基准值出现幅度为 ΔQ_{SVG} 的下沉扰动。随后，若电容器以容量 Q_C 进行瞬时投切，则系统总无功功率将跃升至 $Q_{ref}+(Q_C-\Delta Q_{SVG})$，相较基准值引发过冲扰动，幅值为 $Q_C-\Delta Q_{SVG}$。

因此，整个投切过程所引发的扰动可分为“下沉”与“过冲”两个阶段，其扰动程度由 2 者中的较大值决定。为保证系统平稳过渡，本文以最小化下沉与过冲中较大值作为控制目标，即：

$$\min(\max(|\Delta Q_{SVG}|,|Q_C-\Delta Q_{SVG}|)) \tag{21}$$

当两者幅值相等时，上述最大扰动量可达最小值，解得：

$$\Delta Q_{SVG}=0.5Q_C \tag{22}$$

通过理论分析可得：当 GFM-SVG 输出减少至 $0.5Q_C$ 时投切电容器，其叠加扰动为最小，仅为 $0.5Q_C$。此时系统处于无功斜率匹配点，投切对电压造成的冲击最小，最有利于维持电压稳定性。

基于上文，可计算出第 1 次电容器投入的最优投切相位 t_{pinop1}：

$$t_{pinop1}=\frac{Q_C}{2k} \tag{23}$$

将式(13)—(20)代入式(23)可得到：

$$t_{pinop1}=\frac{M\Delta t_{pin}}{2M-1} \tag{24}$$

第 j 次投入电容器的时刻 t_{pinopj} 即为：

$$t_{pinopj}=\frac{(2Mj-j-M+1)\Delta t_{pin}}{2M-1},j=1,2,\cdots,M \tag{25}$$

3 仿真验证

为验证所提控制策略在电压扰动条件下的有效性与工程适应性，本文基于 PSCAD/EMTDC 平台，构建了 GFM-SVG 与电容器并网协同运行的仿真模型，开展典型工况下的动态响应仿真与对比分析。所用 GFM-SVG 装置的设计参数如表 1 所示。

3.1 无功环控制参数整定验证

基于第 1.2 节所建立的无功控制小信号模型完成了无功积分系数 K_i 与无功调压下垂系数 K_v 的整定，其取值为：K_i=53.768，K_v=12.5。

针对 GFM-SVG 的无功控制参数整定策略，设置典型扰动工况：仿真运行初始电压状态为 1.0 pu，7.0 s 时系统电压骤降至 0.9 pu；8.0 s 时故障清除，电压恢复至额定值。

仿真结果如图 4 所示，其中图 4(a)为并网点电压响应曲线，图 4(b)为输出无功功率响应曲线。仿真表明，电压跌落后，GFM-SVG 迅速注入容性无功，使并网点电压在 t_r=23 ms 内恢复至 0.98 pu，满足 t_r≤50 ms 的设计要求，验证了无功下垂系数与积分系数整定的合理性。

为验证所提无功控制参数整定方法在提升 GFM-SVG 无功-电压响应性能方面的有效性，本文选取文献[9]中的积分系数 K_i= 10 与文献[10]计算得到的 K_i= 7.2 作为对比对象，仿真工况保持一致，响应曲线如图 5 所示。结果表明，本文所整定参数下系统具备更快的动态响应速度，验证了所提方法的可行性。

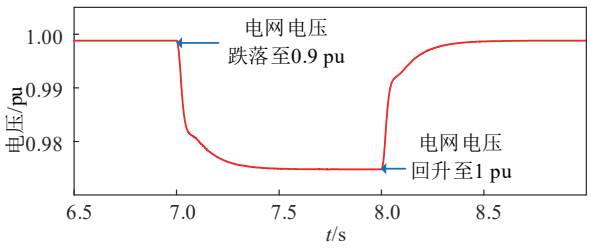
3.2 GFM-SVG 与电容器时序协同配合方法验证

为进一步验证本文所提出的 GFM-SVG 时序协同控制配合电容器相位投切方法验证，构建了典型仿真场景，选取并网点电压和无功功率作为主要观

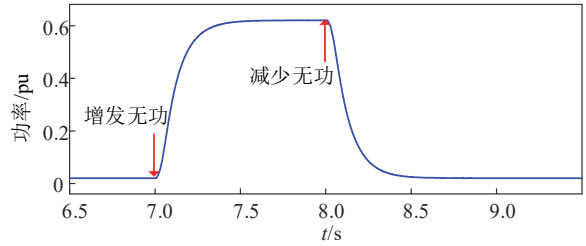
表 1 GFM-SVG 电路参数

Table 1 Design parameters of GFM-SVG

参数	符号	数值
机组容量/MVA	S_{base}	60
滤波电感/H	L_{conv_G}	0.000 335
滤波电容/μF	C_f	800
虚拟电抗/pu	$\omega_0 L_v$	0.7
虚拟电阻/pu	R_v	0.08



(a) 并网点电压响应曲线



(b) GFM-SVG 输出无功功率响应曲线

图 4 电压突降时 GFM-SVG 无功/电压响应特性

Fig.4 Characteristics of GFM-SVG reactive power/voltage response during voltage dips

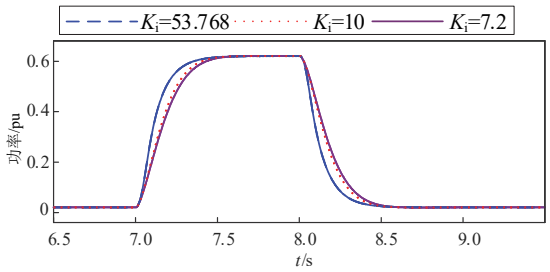


图 5 不同无功积分系数下无功功率响应曲线对比

Fig.5 Comparison of reactive power response curves with different reactive power integration factors

测对象。初始状态下，GFM-SVG 以满功率运行，提供 60 Mvar 的无功支撑，随后通过 3 组容量均为 20 Mvar 的电容器组分阶段替代 SVG 的部分出力，实现无功源的动态向静态迁移。

在仿真过程中，分别设置两种投切方式以进行对比：一种为基于本文提出的最优相位投切策略，另一种为传统的定时间隔非最优投切方式。在最优策略中，投切时刻严格按照前文推导所确定，以最小化无功冲击；而在非最优策略中，电容器组在固定时间点投入，未考虑系统相位状态与 SVG 出力同步关系，具体每次投切时刻 t_j 如表 2 所示。

图 6 展示了无功功率输出的变化情况，其中实线对应最优相位投切策略下的并网点无功功率波动范围为 0.509 5 pu 至 0.806 8 pu；而虚线表示非最优策略下的波动范围为 0.652 1 pu 至 0.957 4 pu，明显大于前者，表明最优策略可以减小无功功率的波动。

图 7 反映了母线电压的波动特性。在非最优策略下，电压波动范围为 1.028 8 pu 至 1.092 3 pu；采用最优策略后，电压波动被有效收敛至 0.990 7 pu 至 1.053 2 pu，实现了电压波动幅值的显著抑制，避免了置换过程电压超出正常水平。

为进一步评估所提出的动、静态无功源时序协同配合机制对暂态电压调节性能的影响，设置典型扰动工况：在 19 s 时电网电压骤降至 0.9 pu，随后 20 s 时故障清除，系统电压恢复至正常水平。图 8 给出了置换前后并网点电压的动态响应对比曲线。

为进一步验证所提策略在不同类型电压故障条件下的适用性，本文设计了典型三相接地短路工况，在 19 s 时发生，持续时间为 100 ms，并在 19.1 s 时清除。图 9 展示了置换策略实施前后，并网点电压的动态响应对比曲线。

表 2 无功源置换时刻

Table 2 reactive source replacement moment

方法	t_1/s	t_2/s	t_3/s
所提方法	6.28	10.28	14.28
传统方法	4	8	12

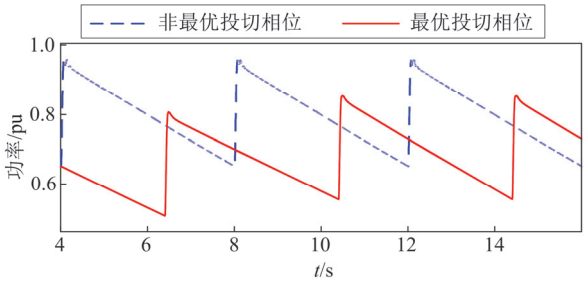


图 6 无功功率波动对比图

Fig.6 Comparison chart of reactive power fluctuation

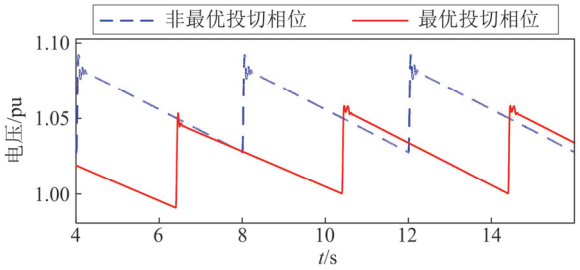


图 7 电压波动对比图

Fig.7 Comparison chart of voltage fluctuation

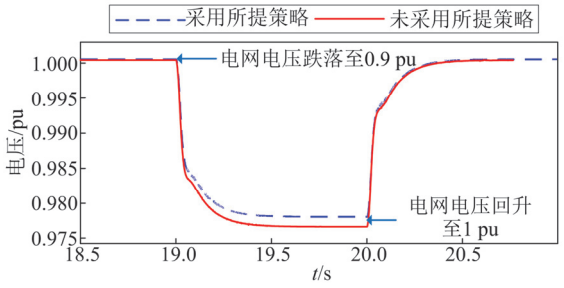


图 8 电网电压跌落下的并网点电压变化

Fig.8 Grid voltage drop and grid connection point voltage changes

仿真结果表明：在相同扰动条件下，采用置换策略后，扰动期间系统电压故障跌落深度减小，表明暂态过程中无功支撑能力得到提升。

综上所述，所提出的动、静态无功源时序协同控制策略在系统运行中展现出以下优势：其一，最优相位投切策略可有效减小无功功率与电压波动，缓解因电容器阶梯投切引发的电压越限问题；其二，

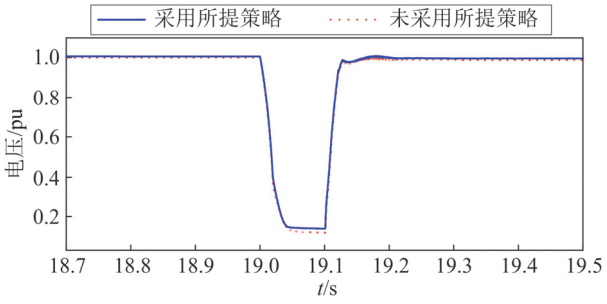


图 9　三相短路接地工况下的并网点电压变化

Fig.9　Voltage changes at the grid connection point under three-phase short-circuit grounding conditions

动、静态无功源的协同运行使 GFM-SVG 有效释放稳态时被占用的动态无功容量，从而释放了 GFM-SVG 的暂态电压支撑潜力。

4　结论

为充分释放 GFM-SVG 暂态电压支撑潜力，并降低电容器投切过程中引发的无功冲击与电压波动，本文提出了考虑最优相位投切的 GFM-SVG 与电容器时序协同配合方法，并通过电磁暂态仿真进行了验证。主要结论如下：

1）提出了提升 GFM-SVG 无功动态响应特性的无功控制参数整定方法，仿真结果表明，GFM-SVG 在电网电压扰动期间的暂态响应时间为 23 ms，满足国标要求。

2）构建了 GFM-SVG 与电容器的时序协同配合方法，实现稳态阶段电容器的有序投入，有效释放了 GFM-SVG 暂态电压支撑潜力，增强了动态与静态无功资源的协同互补能力。

3）针对电容器投切过程中引发的无功冲击与电压波动问题，提出了以波动最小化为目标的电容器最优相位投切策略，仿真分析验证了该策略有助于降低无功波动和电压越限风险。

参考文献　References

[1] 迟永宁，江炳蔚，胡家兵，等. 构网型变流器：物理本质与特征[J]. 高电压技术，2024，50(2)：590-604.
CHI Yongning, JIANG Bingwei, HU Jiabing, et al. Grid-forming converters: physical mechanism and characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 590-604.

[2] 于　琳，孙华东，徐式蕴，等. 电力电子设备接入电压支撑强度量化评估指标综述[J]. 中国电机工程学报，2022，42(2)：499-514.
YU Lin, SUN Huadong, XU Shiyun, et al. Overview of strength quantification indexes of power system with power electronic equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 499-514.

[3] 李　明，常永康，毛永涛，等. 高渗透率新能源发电并网变流器跟网/构网型稳定控制技术综述与展望[J]. 高电压技术，2024，50(11)：4773-4788.
LI Ming, CHANG Yongkang, MAO Yongtao, et al. Review and prospect of stability control techniques for grid-following/grid-forming converters in high-penetration renewable energy generation[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(11): 4773-4788.

[4] 雷　雨，李光辉，王伟胜，等. 跟网型和构网型新能源并网控制阻抗对比与振荡机理分析[J]. 中国电机工程学报，2025，45(1)：150-162.
LEI Yu, LI Guanghui, WANG Weisheng, et al. Comparison of impedance characteristics and oscillation mechanism for grid following and grid forming renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 150-162.

[5] NGUYEN P L, ZHONG Q C, BLAABJERG F, et al. Synchronverter-based operation of STATCOM to mimic synchronous condensers[C]//Proceedings of the 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Singapore, Singapore: IEEE, 2012: 942-947.

[6] LI G X, CHEN Y D, LUO A, et al. An enhancing grid stiffness control strategy of STATCOM/BESS for damping sub-synchronous resonance in wind farm connected to weak grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(9): 5835-5845.

[7] LI G X, MA F J, WANG Y C, et al. Design and operation analysis of virtual synchronous compensator[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(4): 3835-3845.

[8] 张家玮，张　琛，史先强，等. 储能型静止无功发生装置及其自同步电压源控制[J]. 高电压技术，2023，49(1)：61-71.
ZHANG Jiawei, ZHANG Chen, SHI Xianqiang, et al. Energy-storage-type static var generator and its autonomous-synchronization voltage source control[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 61-71.

[9] 刘　辉，孙大卫，宋　鹏，等. 电压环对光伏虚拟同步机系统稳定性的影响[J]. 太阳能学报，2021，42(3)：311-318.
LIU Hui, SUN Dawei, SONG Peng, et al. Influence of voltage loop on stability of photovoltaic virtual synchronous generators[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(3): 311-318.

[10] 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.

[11] 段　玉，朱子民，王小云，等. 基于改进粒子群算法的自适应构网型变流器控制策略[J]. 广东电力，2024，37(2)：10-17.
DUAN Yu, ZHU Zimin, WANG Xiaoyun, et al. Adaptive grid-type converter control strategy based on improved particle swarm algorithm[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(2): 10-17.

[12] 张　波，高　远，王　磊，等. 考虑光伏电源可靠性的配电网无功电压调控策略[J]. 高电压技术，2023，49(7)：2775-2784.
ZHANG Bo, GAO Yuan, WANG Lei, et al. Reactive voltage control strategy of distribution network considering the reliability of photovoltaic power supply[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2775-2784.

[13] 黎家明，霍群海，尹靖元，等. 考虑柔性有载调压变压器的两阶段电压无功优化协调控制方法研究[J]. 电网技术，2025，49(1)：272-283.
LI Jiaming, HUO Qunhai, YIN Jingyuan, et al. Research on two-stage voltage and reactive power optimization coordinated control method considering flexible on-load tap changer[J]. Power System Technology, 2025, 49(1): 272-283.

[14] NAZIR N, ALMASSALKHI M. Voltage positioning using co-optimization of controllable grid assets in radial networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 2761-2770.

[15] 王浩哲，丁爱飞，陆继翔，等. 计及新能源接入的地区电网人工智能无功优化[J]. 电网与清洁能源，2023，39(1)：133-142.
WANG Haozhe, DING Aifei, LU Jixiang, et al. Artificial intelligence reactive power optimization of regional power grids considering renewable energy access[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(1): 133-142.

[16] 佟 曦，侯朗博，孙 昊，等. 高比例光伏和电动汽车接入配电网的无功优化[J]. 智慧电力，2023，51(10)：31-37，102.
TONG Xi, HOU Langbo, SUN Hao, et al. Reactive power optimization of distribution networks with high proportion of PV and EVs[J]. Smart Power, 2023, 51(10): 31-37, 102.

[17] 臧 谦，胡文平，杨少波，等. 计及网络重构的多变电站协同优化方法[J]. 电力系统及其自动化学报，2021，33(3)：125-131.
ZANG Qian, HU Wenping, YANG Shaobo, et al. Coordinated optimization method for multiple substations with the consideration of network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(3): 125-131.

[18] 蔡锴涵，管 霖，张 野，等. 考虑多目标全场景的大规模光伏集群送端系统无功优化配置[J]. 电力系统自动化，2025，49(7)：91-102.
CAI Zihan, GUAN Lin, ZHANG Ye, et al. Optimal configuration of reactive power for large-scale photovoltaic cluster sending-end system considering multiple objectives and all scenarios[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(7): 91-102.

[19] 詹长江，吴 恒，王雄飞，等. 构网型变流器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报，2023，43(6)：2339-2358.
ZHAN Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfei, et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2339-2358.

[20] 王 凤，许建中. 基于构网储能型 SVG 的自适应限流策略[J]. 电力系统保护与控制，2024，52(23)：54-64.
WANG Feng, XU Jianzhong. Adaptive current limiting strategy based on grid-forming and energy-storage SVG[[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(23): 54-64.

[21] 杨 苓，黄俊滔，朱涤凡. 基于复合虚拟阻抗的混合储能系统功率分频协调与谐波电流抑制策略[J]. 高电压技术，2023，49(5)：2017-2028.
YANG Ling, HUANG Juntao, ZHU Difan. Power division coordination and harmonic current suppression strategy for hybrid energy storage system based on composite virtual impedance[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 2017-2028.

[22] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会. 虚拟同步机 第1部分：总则：GB/T 38983.1—2020[S]. 北京：中国标准出版社，2020.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Virtual synchronous machine-part 1: general: GB/T 38983.1—2020[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2020.



马宏伟
2002—，男，硕士生
主要从事电力系统稳定性分析与控制的研究工作
E-mail: 18265847748@163.com

MA Hongwei



刘朋印(通信作者)
1996—，男，博士
主要从事电力系统稳定性分析与控制方面的研究工作
E-mail: pengyin_liu@sdu.edu.cn

LIU Pengyin
Ph.D.
Corresponding author

收稿日期 2025-05-08 在线出版日期 2025-08-21 编辑 陈 蔓