

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240027

基于故障穿越演化特性的 SVG 电磁暂态模型测辨方法

夏楠¹, 罗傲京², 晁璞璞², 张青蕾³, 李卫星², 王潇平¹

(1. 国网陕西省电力有限公司电力科学研究院, 陕西 西安 710100; 2. 大连理工大学电气工程学院, 辽宁 大连 116024;
3. 国网陕西省电力有限公司电力调度控制中心, 陕西 西安 710049)

摘要: 建立准确的静止无功发生器(static var generators, SVG)白盒电磁暂态仿真模型是分析电网电压稳定特性的前提。然而, 由于 SVG 的控制器结构和参数保密, 其建模大都基于典型控制结构和参数, 模型的暂态输出特性与实际差异较大。针对上述问题, 提出了基于 SVG 厂家封装黑盒模型故障穿越(fault ride-through, FRT)演化特性的电磁暂态模型测辨方法。首先, 分析了厂家黑盒模型的拓扑特征, 通过多工况故障穿越响应测试, 厘清了其故障穿越演化特性。然后, 通过分析不同控制环节暂态切换过程对 SVG 故障穿越响应特性的影响和作用途径, 提出了基于 SVG 故障穿越响应演化形态的控制器结构辨识方法。通过分析 SVG 不同控制环节参数对其故障穿越响应特性的分阶段作用原理, 提出了基于故障穿越响应幅值的控制器参数分步辨识方法, 形成了 SVG 的白盒化电磁暂态模型测辨方法体系。最后, 将建立的不同型号白盒仿真模型与对应厂家黑盒模型进行了故障穿越响应特性对比分析, 发现其误差远小于现行标准的允许误差, 证明了提出方法的有效性和通用性。

关键词: SVG; 厂家黑盒模型; 故障穿越响应特性; 电磁暂态模型; 控制器结构辨识; 控制器参数辨识

Identification method of an electromagnetic transient model for an SVG based on fault ride-through evolution characteristics

XIA Nan¹, LUO Aoqing², CHAO Pupu², ZHANG Qinglei³, LI Weixing², WANG Xiaoping¹

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Xi'an 710100, China; 2. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd. Dispatching and Control Center, Xi'an 710049, China)

Abstract: Establishing an accurate white box electromagnetic transient simulation model for static var generators (SVGs) is a prerequisite for analyzing the voltage stability characteristics of the power grid. However, existing models often use generic control structures and parameters because of confidentiality issues of the SVG controller, resulting in significant discrepancies between transient output characteristics and actual performance. To solve these issues, this paper proposes an electromagnetic transient model identification method based on the fault ride-through (FRT) evolution characteristics of the SVG manufacturer packaged black box model. First, this paper analyzes topological characteristics of the manufacturer's black box model, and clarifies its FRT evolution characteristics through multi-condition FRT response testing. Then, by analyzing the impacts and pathways of transient switching processes of different control parts of the SVG, a controller structure identification method based on the evolution form of the FRT response is proposed. By analyzing the influencing mechanism of different SVG control parameters on FRT response characteristics by stages, a step-by-step identification method for controller parameters based on FRT response amplitude is proposed, forming a white box electromagnetic transient model identification method system for the SVG. Finally, a comparison is made between the established white box simulation models of different models and the corresponding manufacturer's black box models in terms of FRT response characteristics. This finds that the error is much smaller than the allowable error of the current standard, proving the effectiveness and universality of the proposed method.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52377077).

Key words: static var generator (SVG); manufacturer's black box model; fault ride-through response characteristics; electromagnetic transient model; controller structure identification; controller parameter identification

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (52377077); 国网陕西省电力有限公司科技项目资助“新能源场站SVG半实物仿真及控制策略优化研究” (5226KY22000F)

0 引言

随着新能源发电装机容量的增加,由其引起的电压波动和不稳定现象逐步显现。新能源并网后的电压波动和消纳水平与新能源场站的无功调节能力密切相关^[1-3],因此新能源场站常配备无功补偿装置。静止无功发生器(static var generators, SVG)凭借其响应速度快、运行范围广、谐波含量少等优势,成为了当前新能源场站无功补偿装置的首要选择^[4]。

SVG 和新能源场站都含有大量的电力电子器件,对其进行动态特性的模拟需要构建详细的电磁暂态模型,但由于知识产权保护和商业保密等,厂家提供给运行分析人员的通常为黑盒模型,控制器的结构和参数不可见,严重制约了其接入系统的控制策略设计。因此,建立能够反映 SVG 实际运行特性的白盒电磁暂态模型,是新型电力系统运行控制亟需解决的关键。

目前关于 SVG 的研究多从拓扑结构、PI 控制策略、直流电压控制策略、调制策略等方面优化,改善其动态调节性能。在拓扑结构优化方面:文献[5]在级联 H 桥结构的基础上混合了多电平结构,改善了电能质量;文献[6]提出了一种并联混合式拓扑,用于 SVG 时可调整调制度以提高效能,同时减少开关器件的使用;文献[7]提出了一种针对光伏场站及 SVG 接入的配电网系统动态无功电压控制方法,以实现扰动下多无功源协同调压目标。在 PI 控制策略优化方面:文献[8]设计了自调节模糊逻辑 PI 控制器,证明了该种控制器的优越性;文献[9]在前馈控制处加入重复 PI 控制,提高了系统的动态性能;文献[10]针对不对称故障,移动了控制点,减少了 SVG 三相之间的有功功率交换,有效提高了不对称故障下电网电压的稳定性。在直流侧电压控制方面,文献[11-13]通过注入零序电流的方式,补偿平衡直流侧电压负序电流,实现对相间直流侧电压的平衡控制。调制方式改进方面:文献[14]提出了一种不连续调制策略,考虑了两倍基频下的电容器电压振荡以及零序电压注入对电容器电压的影响;文献[15]提出了一种改进的模块化 SVG 并联交错调制方式。以上方面的改进均基于 SVG 的典型结构和参数,针对研究的场景进行定制化设计,而典型结构和参数与实际控制器存在差异,导致现有模型的响应与实际响应之间的误差较大,难以直接应用于工程实践。

关于 SVG 模型参数的优化和辨识研究较少,文献[16]推导出能够衡量系统小扰动稳定性的二次型指标,采用蒙特卡洛方法对多组关键控制参数进行

优化,使用该方法优化后的系统小扰动稳定性增强,但蒙特卡洛方法收敛性慢,辨识效率不高。文献[17]使用遗传算法对 SVG 控制器进行参数整定,以改善风电系统的暂态稳定性,但该方法的辨识效率和精确性依赖于种群规模和突变率等参数,而且这些参数缺少标准化的设定规则。文献[18]设计了混沌布谷鸟算法的改进方案,提高了风机参数辨识的效率和精度,但其仍没能探明各参数的影响机理。文献[19]基于硬件在环试验的实测数据,采用最小二乘法对 SVG 机电模型参数进行辨识,该方法虽然以实测数据为基础,但辨识对象仍为机电暂态模型。

综上,目前 SVG 的研究多侧重于对典型控制策略和参数的优化以及一些机电暂态参数的简单辨识,缺少对实际控制器结构的测辨,当前的参数辨识方法大多依赖于智能算法,较少对参数影响机理进行分析,导致盲目寻优、辨识效率不高等。为解决上述问题,本文从 SVG 厂家黑盒模型多工况的故障穿越(fault ride-through, FRT)响应测试出发,提出了 SVG 电磁暂态模型的测辨方法:基于实测故障穿越响应演化形态辨识控制器结构、基于故障穿越响应幅值辨识控制器参数,上述方法弥补了对控制器结构辨识研究的空白,对各参数影响响应幅值的机理进行了分析,设计了分步分层辨识流程,通过建立的不同型号白盒仿真模型与对应厂家黑盒模型的故障穿越响应特性的对比,验证了所提测辨方法的有效性和通用性。

1 基于 SVG 厂家黑盒模型的故障穿越测试及特性分析

1.1 厂家黑盒模型

厂家黑盒模型是制造厂商提供的可以完备模拟实际装置运行特性的模型,如图 1 所示。该型号 SVG 是高压直挂式并网,主电路由受控电压源表征详细的变流器,使用电感型滤波器并网,主电路参数可从黑盒模型中直接读取(如表 1 所示),但其控制策略及参数为商业机密,需要辨识。

1.2 故障穿越响应特性测试及特性分析

按照标准“风电场动态无功补偿装置并网性能测试规范 NB/T 10316 - 2019”^[20]的要求,需分别测试 SVG 在恒无功和恒电压两种模式下的故障穿越能力。恒电压模式的测试工况要求如表 2 所示,需记录每个工况在全过程下的 SVG 并网点正序电压、无功功率和无功电流。

恒无功模式的测试工况要求如表 3 所示,测试结果记录的形式与恒电压模式一致。

为直观展示 SVG 在不同控制模式下的实际响

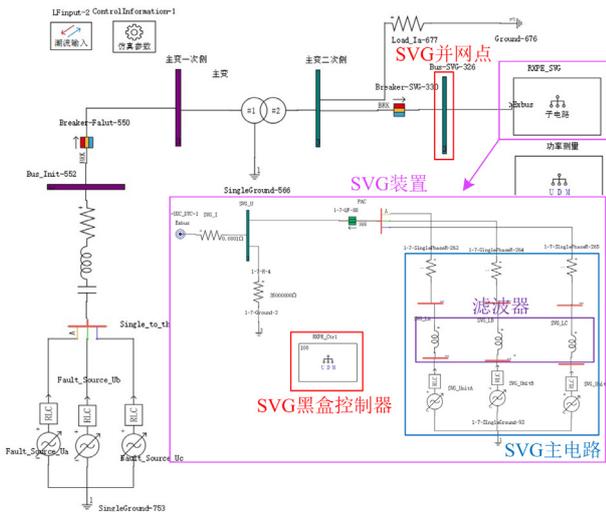


图 1 某型号 SVG 厂家黑盒模型

Fig. 1 Black box model of a SVG manufacturer

表 1 SVG 装置基本参数

Table 1 Basic parameters of SVG device

参数名称	参数值
额定容量/Mvar	13
装置额定电压 U_k /kV	37
并网滤波器电感值 L /mH	33.5

表 2 恒电压模式测试工况表

Table 2 Test conditions in constant voltage mode

电压跌落 工况/p.u.	故障持续 时间/ms	电压升高 工况/p.u.	故障持续 时间/ms
0.20±0.05	625±20	1.3±0.03	500±20
0.50±0.05	1214±20	1.25±0.03	1000±20
0.90-0.05	2000±20	1.2±0.03	10000±20

表 3 恒无功模式测试工况表(恒无功电流或恒无功功率)

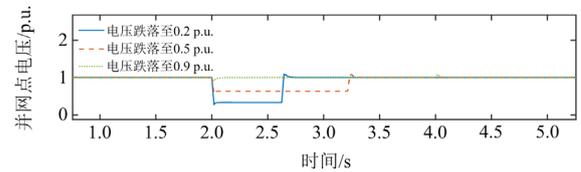
Table 3 Test conditions in constant reactive power or constant reactive current mode

初始运行状态	电压变化 工况/p.u.	故障持续 时间/ms
初始无功小于 20%额定感性无功	同表 2	同表 2
初始无功大于 90%额定感性无功		
初始无功小于 20%额定容性无功		
初始无功大于 90%额定容性无功		

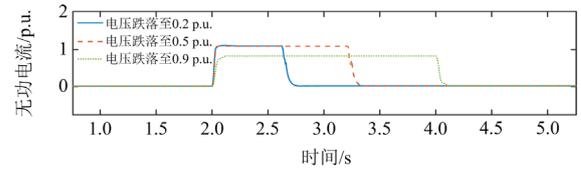
应特性, 节选了如图 2 所示的 SVG 在恒电压模式的测试结果和如图 3 所示的恒无功模式测试结果。

由图 2 和图 3 可知, 2 s (t_0) 时 SVG 端口发生三相短路故障, 机组检测到电压跌落至低穿阈值并经历短时暂态 (t_0-t_1) 后, SVG 输出稳定的感性无功电流, 使并网点电压升高, 电压、无功电流以及功率均迅速进入故障持续期间的稳态; 2.625 s (t_2) 时

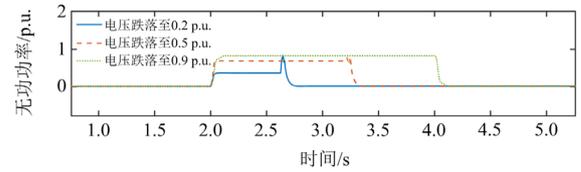
故障清除, 电压、无功电流以及功率历经短时暂态 (t_2-t_3) 后, 恢复至故障发生前的稳态值。根据以上 SVG 响应特性测试结果, 得到如图 4 所示的 SVG 通用故障穿越曲线。依据 SVG 的响应过程, 参照风电故障穿越的阶段划分方法^[21], 将 SVG 故障穿越全



(a) 并网点电压测试结果



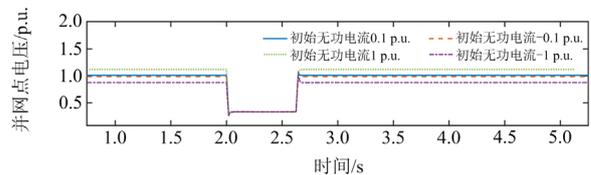
(b) 并网点电流测试结果



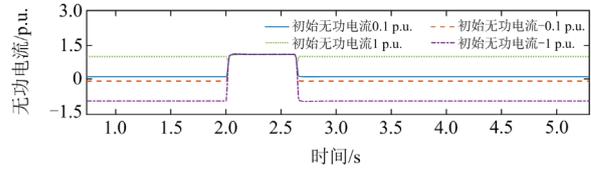
(c) 并网点无功功率测试结果

图 2 恒电压模式下的故障穿越响应特性测试结果

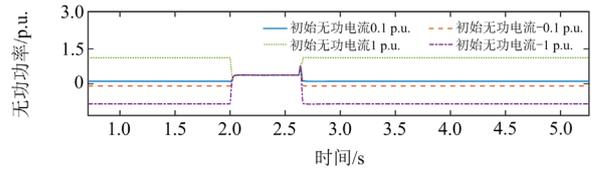
Fig. 2 Test results of FRT response in constant voltage mode



(a) 并网点电压测试结果



(b) 并网点电流测试结果



(c) 并网点无功功率测试结果

图 3 恒无功模式下的故障穿越响应特性测试结果

Fig. 3 Test results of FRT response in constant reactive current mode

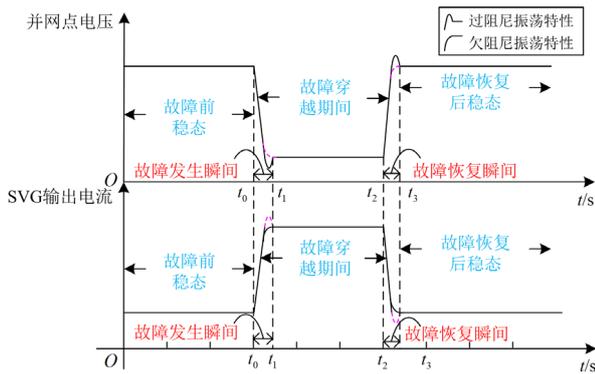


图 4 SVG 故障穿越全过程通用响应曲线
Fig. 4 General response curves of SVG during complete FRT processes

过程的响应分为故障前的稳态、故障发生瞬间的暂态、故障穿越期间的暂稳态、故障恢复瞬间的暂态以及故障恢复后的稳态 5 个阶段。

2 基于 SVG 故障穿越响应演化形态的控制器结构辨识方法

2.1 故障穿越控制器结构的辨识方法

由图 2 和图 3 及其他典型型号的故障穿越测试响应的暂态过程得到如图 5 所示的暂态响应形态库，节选恒电压模式下有故障穿越功率外环控制和恒无功模式下有稳态无功功率外环控制下的典型形态，对响应形态库中的曲线演化过程依次分析，结合大量仿真，发现控制逻辑的暂态切换过程决定 SVG 故障穿越响应曲线形态演变。

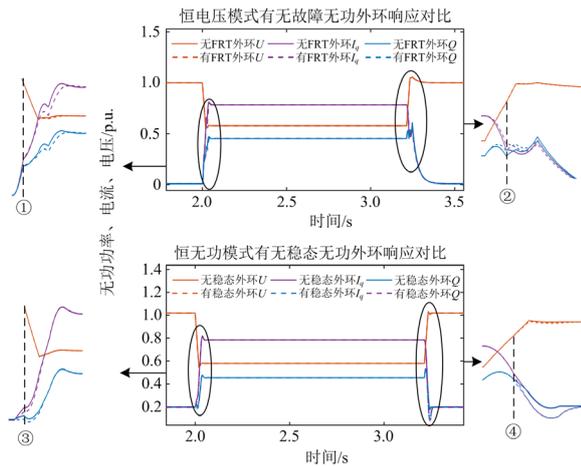


图 5 故障发生和恢复瞬间的暂态响应曲线
Fig. 5 Transient response curves at the moment of the fault occurrence and recovery

如图 5 所示，SVG 的暂态集中于故障起始阶段和故障清除阶段，其典型形态分别为①/③前后和

②/④前后。故障起始阶段典型形态和控制器结构切换的关系如下：当电压跌落至低穿阈值时，SVG 的稳态控制器将切换至故障穿越控制器，切换点为①/③，不同的稳态控制器在①/③之前产生不同的响应形态。若切换前装置发出感性无功电流保持电压不变，稳态控制器为恒电压控制，则响应特性表现出图中①之前所示的暂态过程；若切换前保持输出的无功电流或无功功率不变，稳态控制器为恒无功控制，则响应特性表现出图中③之前所示的暂态过程；若稳态无功控制器加入无功功率外环控制，无功功率在切换之前较电流直接控制更加稳定，响应形态如图中③之前的虚线所示。控制策略切换后，由故障穿越控制器作用，追踪故障穿越期间无功电流的目标值，接下来的响应特性表现出图中①/③之后所示的暂态过程，不同的故障穿越控制器在①/③之后产生不同的响应形态，若故障穿越控制器加入无功功率外环控制，响应形态如图中①之后的虚线所示，响应的超调量更小，但响应时间更长。

故障穿越控制器追踪到目标值后，响应进入到故障期间的暂稳态，故障清除后，当电压恢复至退出低穿阈值时，故障穿越控制器将切换至稳态控制器，切换点为②/④，②/④之前的响应特性仍由故障穿越控制器控制，当其为双闭环结构时，响应形态如图 5 中②之前的虚线所示，响应时间较电流直接控制更长。控制策略切换回稳态控制后，响应特性如图 5 中②/④之后所示，若稳态无功控制器是双闭环控制结构，装置响应时间较长，对应的响应形态如图 5 中④之后的虚线所示。总结以上分析建立如表 4 所示的控制器结构与形态的映射关系。

表 4 控制器结构与响应形态映射关系

Table 4 Mapping relationship between controller structure and response morphological

控制器结构	响应形态
恒电压控制	①/③之前的无功功率和电流同步变化
恒无功无外环控制	①/③之前的无功功率/电流基本不变， ①/③之前和②/④之后的响应时间较短
恒无功双闭环控制	①/③之前的无功功率/电流基本不变， ①/③之前和②/④之后的响应时间较长
FRT 无外环控制	①/③之后和②/④之前的响应时间较短
FRT 双闭环控制	①/③之后和②/④之前的响应时间较长

在对控制器结构辨识时，只需将待辨识厂家黑盒模型的暂态响应与库中的形态进行对比，相似曲线形态在库中映射的控制器结构即为该厂家黑盒模型对应的白盒电磁暂态模型的结构。以某型号的厂家黑盒模型为例，其暂态响应与库中的形态对比图如图 6 所示。由图 6 可知，该厂家黑盒模型的暂态

响应形态与包含功率外环的双闭环故障穿越控制结构更接近, 因此该型号的厂家黑盒模型的故障穿越控制器是功率双闭环控制结构, 如图 7 所示。

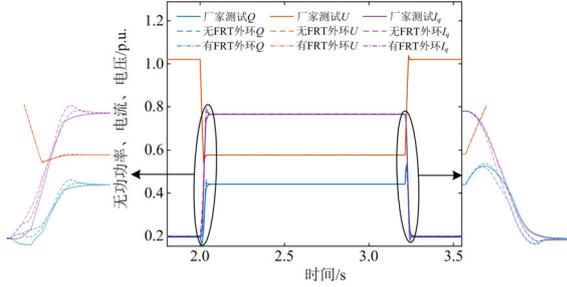


图 6 电流直接控制、功率外环控制与实测对比图

Fig. 6 Result comparison of direct current control, power outer loop control and actual measurement

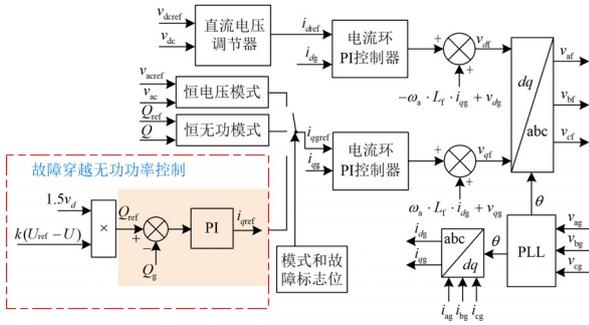


图 7 SVG 故障穿越控制结构

Fig. 7 FRT control structure of SVG

2.2 稳态控制器结构的辨识方法

通过 2.1 节辨识出的故障穿越控制器通常和稳态控制器级联, 实现故障全过程的控制。后者通常采用矢量控制策略, 假设 SVG 并网阻抗为 $R_f + j\omega_a L_f$, 当同步旋转参考坐标系的 d 轴定向于定子磁链时, SVG 的交流侧电压可由式(1)表示。

$$\begin{cases} v_{df} = R_f \cdot i_{dg} + L_f \cdot \frac{di_{dg}}{dt} + v_{dg} - \omega_a \cdot L_f \cdot i_{qg} \\ v_{qf} = R_f \cdot i_{qg} + L_f \cdot \frac{di_{qg}}{dt} + v_{qg} + \omega_a \cdot L_f \cdot i_{dg} \end{cases} \quad (1)$$

式中: R_f 为并网电阻值; L_f 为并网电感值; ω_a 为同步旋转角速度; v 和 i 分别为电压和电流; 下标 f 和 g 分别表示 SVG 侧和电网侧。

假设功率流入变流器的方向为正, 当 d 轴定向于电网电压矢量时, v_d 近似等于电压幅值, v_q 近似等于 0, 可以推导出变流器的输出功率方程为

$$\begin{cases} P_g = -\frac{3}{2} v_g i_{dg} \\ Q_g = \frac{3}{2} v_g i_{qg} \end{cases} \quad (2)$$

式中, P_g 和 Q_g 分别为变流器输出的有功功率和无功功率。

引入 PI 控制器消除变流器交流电流的跟踪误差, 可推导出其交流侧电压的参考值为

$$\begin{cases} v_{dref} = k_{p_i}(i_{dref} - i_{dg}) + k_{i_i} \int (i_{dref} - i_{dg}) dt + \\ R_f i_{dg} - \omega_a L_f i_{qg} + v_{dg} \\ v_{qref} = k_{p_i}(i_{qref} - i_{qg}) + k_{i_i} \int (i_{qref} - i_{qg}) dt + \\ R_f i_{qg} + \omega_a L_f i_{dg} \end{cases} \quad (3)$$

式中: k_{p_i} 和 k_{i_i} 分别为电流控制器的比例和积分系数; i_{dref} 和 i_{qref} 分别为 d 、 q 轴电流参考值。

稳态时生成 q 轴电流参考值的控制器结构由 SVG 的运行模式决定。恒电压模式下, SVG 的输出响应保持控制点电压不变, 引入 PI 控制器消除跟踪交流侧电压的误差, 该模式下 q 轴电流参考值为

$$i_{qref} = k_{p_v}(v_{acref} - v_{ac}) + k_{i_v} \int (v_{acref} - v_{ac}) dt \quad (4)$$

式中: k_{p_v} 和 k_{i_v} 分别为交流电压 PI 控制器比例和积分系数; v_{acref} 和 v_{ac} 分别为交流侧电压参考值与实测值。

恒无功电流或恒无功功率模式下, 根据设定的参考值与测试结果中无功电流和无功功率的映射关系, 即可辨识出相应的控制器结构。

恒无功电流模式下 q 轴电流参考值为

$$i_{qref} = i_{qord} \quad (5)$$

式中, i_{qord} 为无功电流给定值。

恒无功功率模式下, q 轴电流参考值为

$$i_{qref} = Q_{ord} / 1.5v_{dg} \quad (6)$$

式中, Q_{ord} 为无功功率给定值。

综上, 基于 SVG 故障穿越响应演化形态辨识出的某型号 SVG 整体控制器结构如图 8 所示。

3 基于 SVG 故障穿越响应幅值的控制器参数辨识方法

通过对 SVG 各控制器参数进行故障响应的灵敏度分析发现, 影响 SVG 故障穿越响应的控制器主导参数有: 电流极限值 I_{qmax} 和 I_{qmin} 、无功电流计算系数 k_1 和 k_2 、故障穿越电压参考值 U_{ref} 、锁相环 PI 比例积分系数 $k_{p_{pl}}$ 和 $k_{i_{pl}}$ 、电流内环 PI 比例积分系数 k_{p_i} 和 k_{i_i} 、故障无功外环 PI 比例积分系数 k_{p_q} 和 k_{i_q} 及交流电压外环 PI 比例积分系数 k_{p_v} 和 k_{i_v} 。以上参数的具体取值直接决定 SVG 故障穿越响应各

阶段的幅值，如图 9 所示。

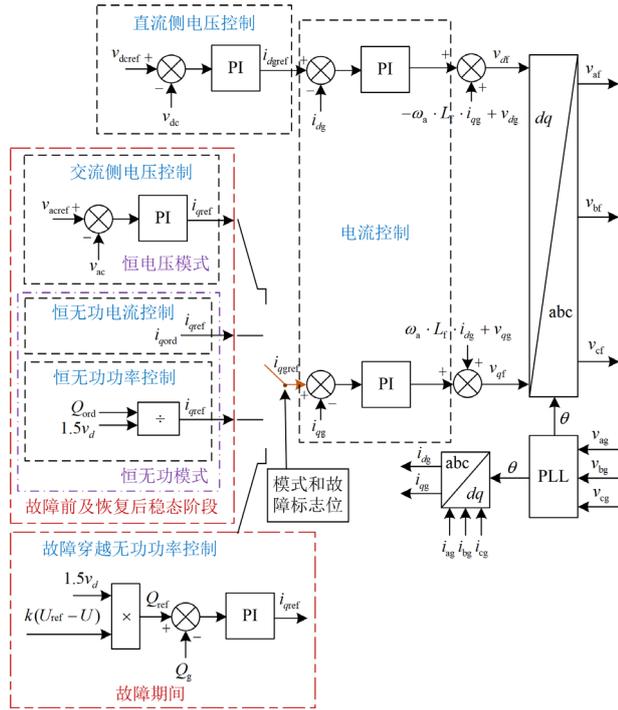


图 8 SVG 整体控制结构

Fig. 8 SVG overall control structure

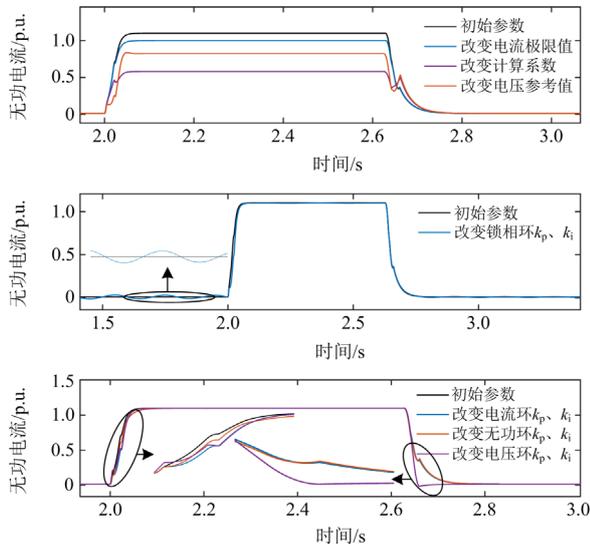


图 9 改变各控制器参数与初始参数下的响应对比图

Fig. 9 Comparison of response curves under changed parameter of controllers and under initial parameters

如图 9 所示，SVG 故障穿越响应特性的主导参数对故障穿越响应特性的影响机理如下：电流极限值、无功电流计算系数及故障穿越电压参考值通过影响故障期间的无功电流输出来影响故障穿越期间暂稳态幅值；锁相环 PI 比例积分系数通过影响锁相

的速度与准确性来影响电压电流 dq 分量的准确性，即影响故障前的稳态幅值跟踪；各控制环 PI 比例积分系数通过影响追踪目标值时的响应速度来影响故障发生和恢复瞬间的暂态幅值。基于以上发现，可分别对各主导参数进行分步辨识。

1) 电流极限值 $I_{q \max}$ 和 $I_{q \min}$

根据全部标准工况故障期间无功电流暂稳态值的最大值，即可确定无功电流输出的上下限，如式(7)所示，该最大值通常是电压跌落至 0.2 p.u. 工况下的故障期间无功电流暂稳态值。

$$\begin{cases} I_{q \max} = \max(I_q(t)), t \leq t_{\text{clear}} \\ I_{q \min} = -I_{q \max} \end{cases} \quad (7)$$

式中， t_{clear} 为故障清除时刻。根据控制逻辑，电流极限值即为故障无功外环 PI 控制器和交流电压外环 PI 控制器的限幅值。

2) 无功电流计算系数 k_1 和 k_2 、故障穿越电压参考值 U_{ref}

首先在全标准工况中筛选出进入故障穿越控制且未达到限幅的工况，根据上述工况在故障穿越期间的无功电流暂稳态值和并网点电压暂稳态值，可拟合得到故障期间无功电流生成策略、无功电流计算系数 k_1 和 k_2 及故障穿越电压参考值 U_{ref} (p.u.)。

对国内不同典型型号机组进行故障期间无功电流生成策略测辨，可得如式(8)所示的无功电流生成策略表达式。

$$I_q = k_1(U_{\text{ref}} - U)I_N + k_2I_{q0}, I_{q \min} \leq I_q \leq I_{q \max} \quad (8)$$

式中： U 为控制点电压标幺值； I_N 为装置额定电流 (A)； I_{q0} 为故障前装置无功电流 (p.u.)。

以前文机组(型号 1)为例，其厂家黑盒模型不同工况下的故障期间暂稳态无功电流与电压数值如表 5 所示，可以看出不同初始无功电流在不同电压跌落工况下的故障期间暂稳态无功电流相同，说明该

表 5 不同工况暂稳态无功电流与电压

Table 5 Transient steady-state reactive current and voltage under different test conditions

初始 I_q /p.u.	电压跌落工况/p.u.	故障期间 I_q /p.u.	故障期间 U /p.u.
0.1	0.2	1.1	0.248
	0.5	1.1	0.548
-0.1	0.2	1.1	0.248
	0.5	1.1	0.548
1	0.2	1.1	0.248
	0.5	1.1	0.548
-1	0.2	1.1	0.248
	0.5	1.1	0.548

型号 SVG 的暂稳态无功电流与初始无功电流无关, k_2 可直接取 0。结合同一初始无功不同电压跌落工况下的无功电流与电压, 对式(8)进行拟合可得到 k_1 和 U_{ref} 。值得提及的是, 通过对式(8)中变量的不同取值可实现不同型号 SVG 动态特性的模拟, 因正文篇幅有限, 类似的测辨过程和结果列举见附录 A。

3) 锁相环和各控制环的比例积分系数

采用最小二乘法列写如式(9)所示的目标函数, 即可辨识控制结构中各 PI 控制器参数。

$$\begin{cases} \min H = \sum_{j=j_1}^{j_2} (y_{p,j}(k_p, k_i) - y_j)^2 \\ \text{s.t.} \begin{cases} k_{p \min} \leq k_p \leq k_{p \max} \\ k_{i \min} \leq k_i \leq k_{i \max} \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

式中: y_p 为不同比例积分系数下故障发生和恢复瞬间的仿真输出; y 为厂家黑盒模型在故障发生和恢复瞬间的实测输出; j_1 和 j_2 分别为截取的开始和结束时刻对应的数据行数; $k_{p \max}$ 、 $k_{p \min}$ 和 $k_{i \max}$ 、 $k_{i \min}$ 分别为比例和积分系数上下限。

在辨识过程中, 通常设置几组不同数量级的积分系数 k_i , 在每个数量级下使用二分法逐步缩小比例系数 k_p 的取值范围, 在确定的范围内取一定的步长遍历所有参数, 得到误差最小的 k_p 。然后, 将不同数量级 k_i 下的辨识结果进行比较, 确定 k_i 的最优取值范围, 在该范围内取一定步长遍历所有参数, 得到误差最小的 k_i , 即可完成一组 PI 系数的辨识。

综上, 本文提出的基于 SVG 故障穿越响应幅值的参数辨识流程如图 10 所示。

如图 10 所示, 本文针对故障穿越响应不同阶段对控制器参数进行分步辨识, 提升了辨识效率。截取故障穿越期间电压、电流的暂稳态幅值, 可完成限幅和指令参数的辨识; 截取故障前电压、电流的稳态幅值, 可完成锁相环比例积分系数的辨识; 截取故障发生和恢复瞬间电压、电流和无功功率的暂态幅值, 可完成对控制环中各比例积分系数的辨识: 在恒无功模式下, 由于故障前和恢复后的稳态阶段仅由电流内环控制, 因此故障发生和恢复瞬间的暂态过程由故障无功外环控制器和电流内环控制器共同决定。而电流内环对暂态过程的影响较小, 可先使用工程整定法给定一组典型的电流内环 PI 控制器比例积分系数, 然后对故障无功外环的参数进行辨识。在确定最优的故障无功外环参数后再辨识电流内环参数, 使整体的目标函数达到最优。恒电压模式下, 暂态过程由交流电压控制器、电流内

环控制器以及故障无功外环控制器共同控制, 但无功外环和电流内环的参数已确定, 只需辨识交流电压外环参数, 使目标函数达到最优, 即可完成全部的参数辨识。本文提出的控制参数辨识方法能够在不同运行模式和故障穿越响应阶段进行分步辨识, 目标函数只需包含对应工况数据即可, 且一次只需辨识一组控制器参数, 可以有效缩短辨识时间, 提高辨识效率。

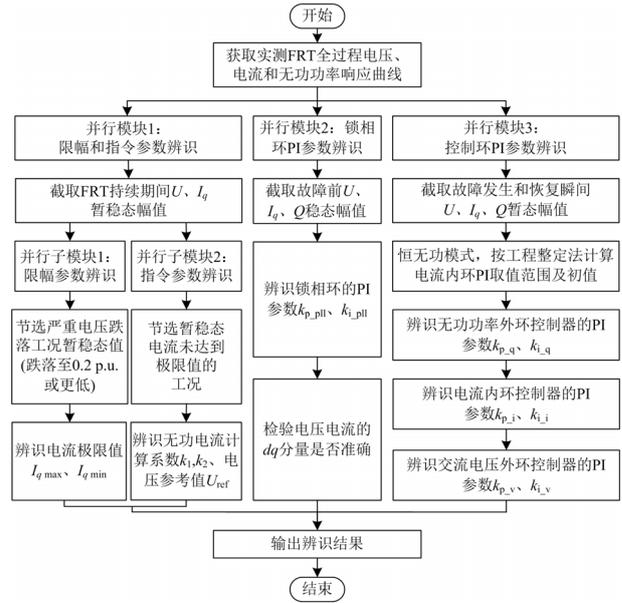


图 10 基于 SVG 故障穿越响应幅值的参数辨识流程

Fig. 10 Parameter identification process based on the amplitudes of SVG FRT responses

4 模型验证及误差分析

为验证提出的 SVG 电磁暂态模型测辨方法的有效性, 本文选取两个典型型号(型号 1、2)分别进行了典型结构模型、基于本文方法测辨的模型和厂家黑盒模型控制器结构、参数和故障响应特性的对比, 具体如下。

传统 SVG 建模常基于的典型控制器结构如图 11 所示, 基于本文方法辨识出的型号 1 机组的控制器结构已于 2.2 节图 8 给出, 辨识出的型号 2 机组的控制器结构如图 12 所示。综合图 8、图 11 和图 12, 可以看出典型结构模型无法准确模拟实际机组的详细控制器结构, 且难以适应不同的机组型号。

基于所提方法依次对型号 1、2 机组进行控制器参数测辨, 结果分别如表 6 和表 7 所示, 在 ADPSS 平台建立的 SVG 电磁暂态模型如图 13 所示。不同工况下型号 1 机组和型号 2 机组的典型模型、基于所提方法测辨的模型和厂家黑盒模型的故障响应特性的对比分别如图 14—图 17 所示。

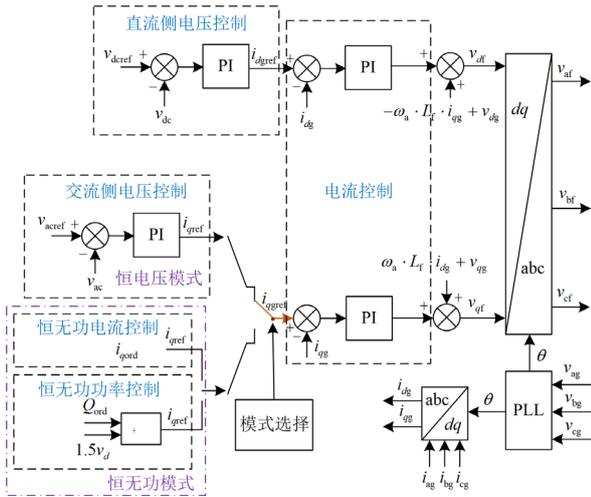


图 11 常用的典型控制器结构

Fig. 11 Common typical controller structure

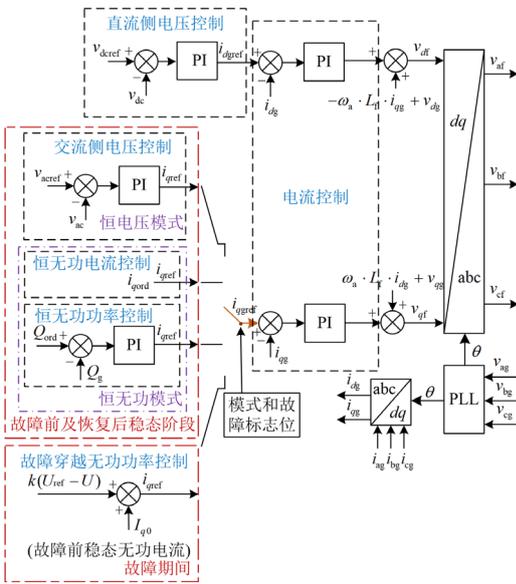


图 12 采用本文所提方法对型号 2 机组辨识出的控制器结构

Fig. 12 The identified controller structure of type 2 based on the proposed method

表 6 SVG 参数辨识结果(型号 1)

Table 6 SVG parameter identification results (type 1)

参数名称	参数值
电流极限值	± 1.1 p.u.
无功调节计算系数 1	5/2.73(空载电压跌落至 0.2 p.u.)
无功调节计算系数 2	0
故障穿越电压参考值	0.85 p.u.
锁相环比例积分系数	$k_{p_pll} = 150, k_{i_pll} = 1000$
交流电压控制器比例积分系数	$k_{p_v} = 0.1, k_{i_v} = 333.33$
无功控制器比例积分系数	$k_{p_q} = 1.2, k_{i_q} = 500$
电流控制器比例积分系数	$k_{p_i} = 3, k_{i_i} = 200$

表 7 SVG 参数辨识结果(型号 2)

Table 7 SVG parameter identification results (type 2)

参数名称	参数值
电流极限值	± 1.095 p.u.
无功调节计算系数 1	1.88/1.48/1.12
无功调节计算系数 2	1
故障穿越电压参考值	0.88 p.u.
锁相环比例积分系数	$k_{p_pll} = 150, k_{i_pll} = 1000$
交流电压控制器比例积分系数	$k_{p_v} = 4.5, k_{i_v} = 600$
无功控制器比例积分系数	$k_{p_q} = 3.5, k_{i_q} = 650$
电流控制器比例积分系数	$k_{p_i} = 4, k_{i_i} = 750$

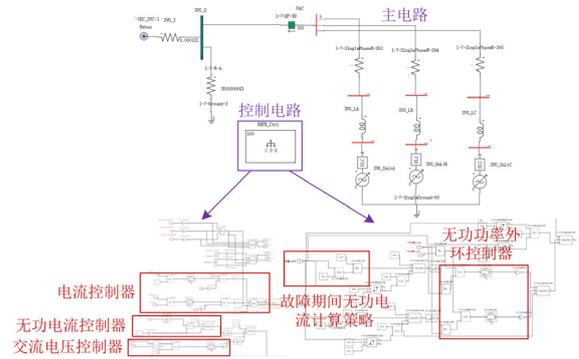
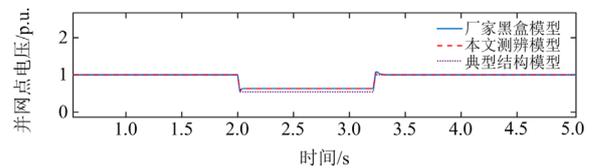
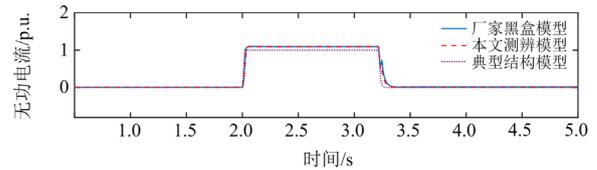


图 13 测辨出的 SVG 电磁暂态白盒模型

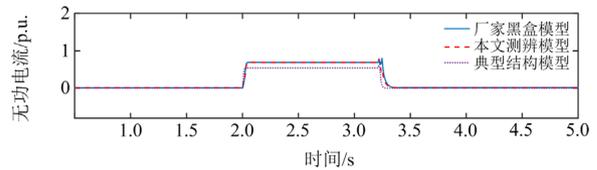
Fig. 13 Identified white-box electromagnetic transient model of the SVG



(a) 并网点电压响应特性的对比



(b) 并网点电流响应特性的对比



(c) 并网点无功功率响应特性的对比

图 14 恒电压模式空载电压跌落至 0.5 p.u.时不同模型的响应特性对比(型号 1)

Fig. 14 Response comparison of different models when voltage drops to 0.5 p.u. in constant voltage mode (type 1)

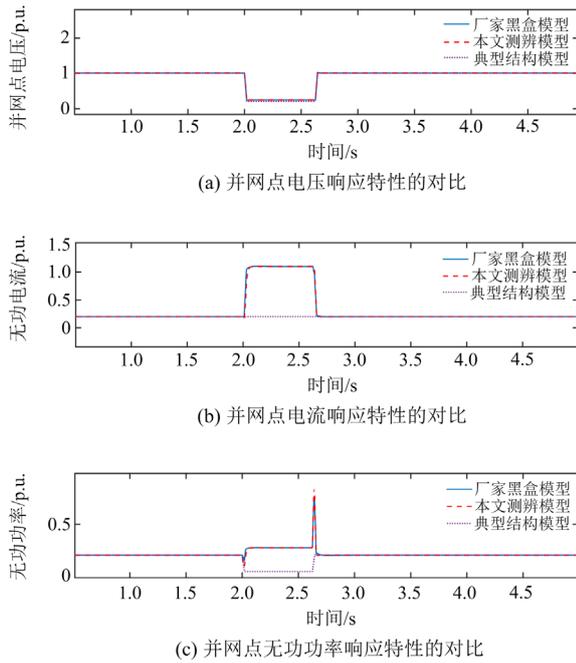


图 15 恒无功模式空载电压跌落至 0.2 p.u.时不同模型的响应特性对比(型号 1)

Fig. 15 Response comparison of different models when no-load voltage drops to 0.2 p.u. in constant reactive power mode (type 1)

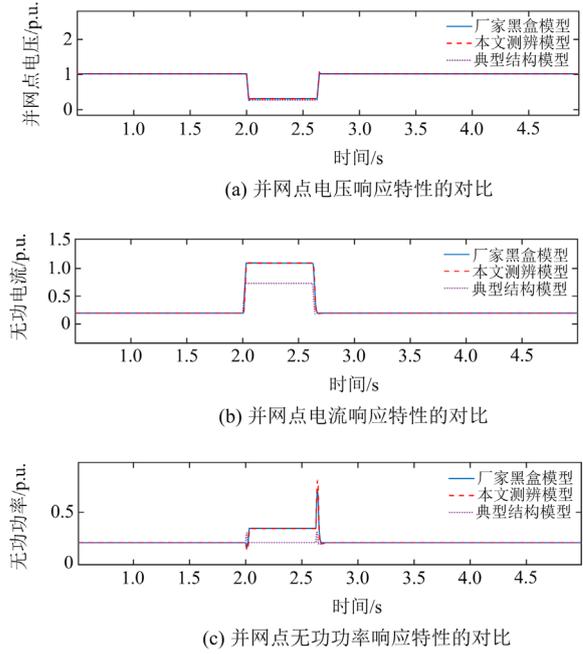


图 17 恒无功模式空载电压跌落至 0.2 p.u.时不同模型的响应对比(型号 2)

Fig. 17 Response comparison of different models when no-load voltage drops to 0.2 p.u. in constant reactive power mode (type 2)

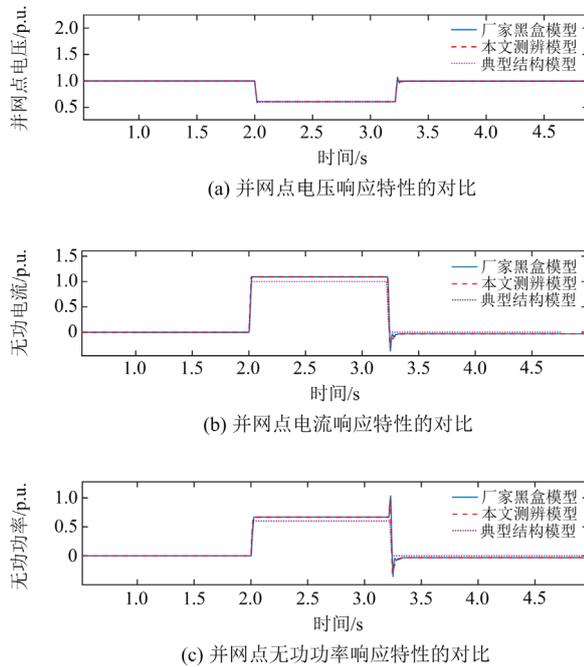


图 16 恒电压模式空载电压跌落至 0.5 p.u.时不同模型的响应对比(型号 2)

Fig. 16 Response comparison of different models when no-load voltage drops to 0.5 p.u. in constant voltage mode (type 2)

综合图 14—图 17 可知, 基于典型结构的模型与实际厂家黑盒模型的故障穿越响应特性误差较大, 而基于本文提出方法测辨出的模型可以较好地模拟实际厂家黑盒模型的响应特性, 且对不同的型号具有良好的适应性。

为更直观地展示典型模型、基于所提方法测辨的模型和厂家黑盒模型故障响应特性的误差, 本文参照“风电机组电气仿真模型建模导则”^[21]对其进行了计算。不同工况下型号 1 和型号 2 典型模型、基于所提方法测辨的模型和厂家黑盒模型的故障响应特性的误差对比图分别如图 18—图 21 所示, 图中

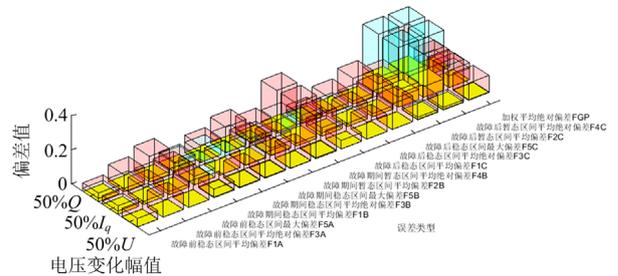


图 18 恒电压模式空载电压跌落至 0.5 p.u.时不同模型的响应误差对比(型号 1)

Fig. 18 Errors comparison of different models when no-load voltage drops to 0.5 p.u. in constant voltage mode (type 1)

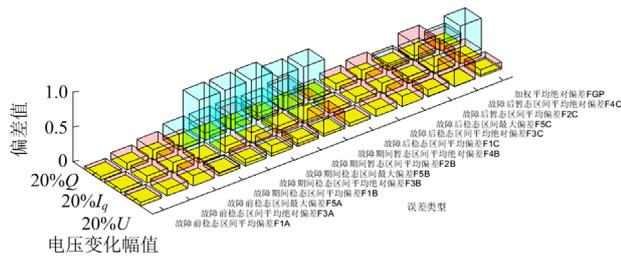


图 19 恒无功模式空载电压跌落至 0.2 p.u.时不同模型的响应误差对比(型号 1)

Fig. 19 Errors comparison of different models when no-load voltage drops to 0.2 p.u. in constant reactive power mode (type 1)

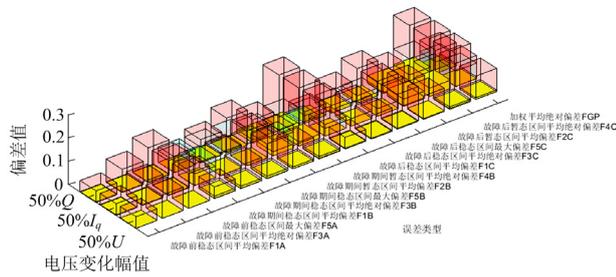


图 20 恒电压模式空载电压跌落至 0.5 p.u.时不同模型的响应误差对比(型号 2)

Fig. 20 Errors comparison of different models when no-load voltage drops to 0.5 p.u. in constant voltage mode (type 2)

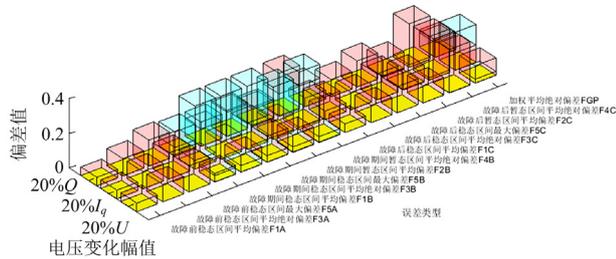


图 21 恒无功模式空载电压跌落至 0.2 p.u.时不同模型的响应误差对比(型号 2)

Fig. 21 Errors comparison of different models when no-load voltage drops to 0.2 p.u. in constant reactive power mode (type 2)

的红色方柱代表标准规定的最大误差，蓝色和黄色方柱分别代表典型模型和基于所提方法测辨的模型与厂家黑盒模型的误差。综合图 18—图 21 可知，本文建立的 SVG 电磁暂态模型的故障穿越响应与厂家黑盒模型测试结果基本一致，误差显著低于典型模型和标准规定的误差，证明了所提 SVG 模型测辨方法的有效性和优势以及对不同型号机组的适应性。

5 结论

本文对 SVG 实测故障穿越响应曲线的暂态过

程进行了分析，提出了基于 SVG 故障穿越响应演化形态辨识控制器结构的方法。并在此基础上，基于实测故障穿越响应曲线的幅值，设计了参数的分步辨识方法，实现了电流限值、无功调节系数、故障穿越电压参考值与各控制器的比例积分系数的高效辨识。基于国产 ADPSS 软件平台，将建立的不同型号白盒电磁暂态模型的故障穿越响应与对应厂家黑盒模型的测试结果进行对比，误差均远小于相关标准要求，证明了所提方法的有效性和通用性。

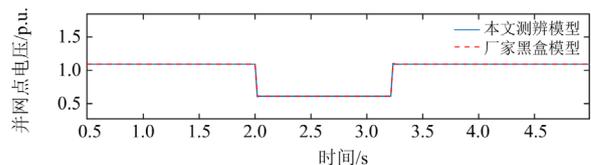
附录 A

型号 2 机组在不同工况下故障穿越前、中、后期的电压电流数据如表 A1 所示，除去未进入穿越的工况，无底色的工况数据即为有效数据。

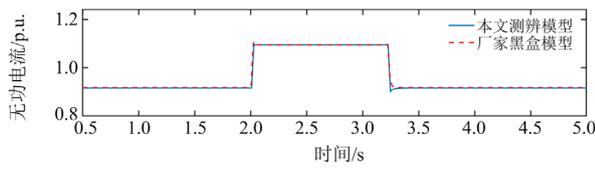
表 A1 不同工况故障穿越前、中、后期无功电流与电压
Table A1 Reactive current and voltage before, during, and after fault crossing of different test conditions

		p.u.					
初始	电压跌	故障	故障	故障	故障	故障	故障
Q	落工况	前 I_q	前 U	期间 I_q	期间 U	后 I_q	后 U
1	0.9	0.918	1.093	1.002	1.001	0.918	1.093
	0.5	0.918	1.093	1.094	0.611	0.918	1.093
	0.2	0.918	1.093	1.095	0.311	0.918	1.093
0.2	0.9	0.195	1.020	0.216	0.922	0.195	1.020
	0.5	0.195	1.020	0.765	0.577	0.195	1.020
	0.2	0.195	1.020	1.095	0.311	0.195	1.020
-1	0.9	-1.096	0.889	-0.969	0.802	-1.096	0.889
	0.5	-1.096	0.889	-0.453	0.454	-1.096	0.889
	0.2	-1.096	0.889	-0.066	0.193	-1.096	0.889
-0.2	0.9	-0.208	0.979	-0.231	0.877	-0.208	0.979
	0.5	-0.208	0.979	0.219	0.522	-0.208	0.979
	0.2	-0.208	0.979	0.501	0.251	-0.208	0.979

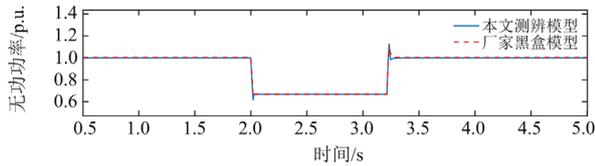
观察表 A1 中故障穿越期间的电压电流数据可得，该型号 SVG 在同一电压跌落工况不同的初始无功功率下，故障期间的电压电流不相同，说明该型号 SVG 的故障期间无功电流生成策略与其初始状态有关系，结合表 A1 中无底色工况的电压电流数据，可得到该型号的故障期间无功电流生成策略式(8)中的 k_2 ，其取值为 1，进一步对式(8)进行拟合得到 k_1 和 U_{ref} 。不同工况下型号 2 基于测辨出的无功电流生成策略和厂家黑盒模型的故障响应特性对比如图 A1、图 A2 所示，发现二者的响应特性基本一



(a) 并网点电压响应特性的对比



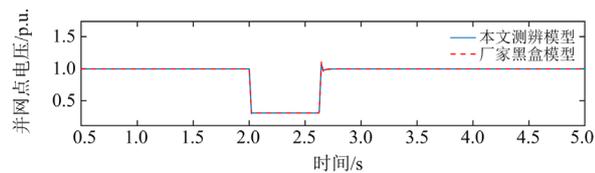
(b) 并网点电流响应特性的对比



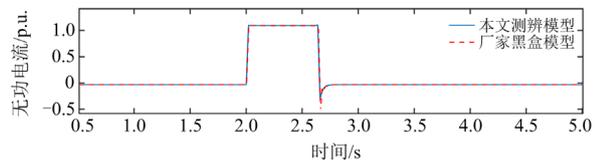
(c) 并网点无功功率响应特性的对比

图 A1 空载电压跌落至 0.5 p.u.时测辨出的模型和厂家黑盒模型的响应特性对比(型号 2)

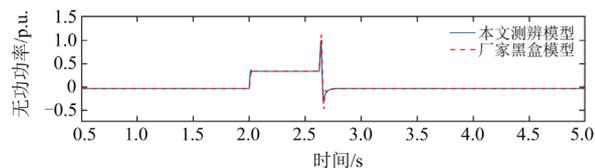
Fig. A1 Response comparison between the identified model and the black box model when no-load voltage drops to 0.5 p.u. (type 2)



(a) 并网点电压响应特性的对比



(b) 并网点电流响应特性的对比



(c) 并网点无功功率响应特性的对比

图 A2 空载电压跌落至 0.2 p.u.时测辨出的模型和厂家黑盒模型的响应特性对比(型号 2)

Fig. A2 Response comparison between the identified model and the black box model when no-load voltage drops to 0.2 p.u. (type 2)

致, 可以看出式(8)的无功电流生成策略对该型号 SVG 仍然适用。

参考文献

[1] 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.

[2] 毛安家, 马静, 蒯圣宇, 等. 高比例新能源替代常规电源后系统暂态稳定与电压稳定的演化机理[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2745-2756.

MAO Anjia, MA Jing, KUAI Shengyu, et al. Evolution mechanism of transient and voltage stability for power system with high renewable penetration level[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2745-2756.

[3] 韩璐, 尹纯亚, 戴晨, 等. 高比例新能源送端系统暂态电压运行风险分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1): 23-34.

HAN Lu, YIN Chunya, DAI Chen, et al. Transient voltage operational risk of a high-proportion new energy sending system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 23-34.

[4] MARTA M, JON A S, TORE U. Low voltage ride through of wind farms with cage generators: STATCOM versus SVC[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(3): 1104-1117.

[5] 杜少通, 刘杰, 周娟, 等. 一种基于 NPC 和 H 桥混合级联的 6 kV 静止无功发生器[J]. 电网技术, 2022, 46(12): 5012-5020.

DU Shaotong, LIU Jie, ZHOU Juan, et al. A 6 kV hybrid cascade static var generator using NPC and H-bridge[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 5012-5020.

[6] IBHAN C R, SIBA K P, ANSHUMAN S. Parallel-hybrid converter based STATCOM: operating principles and capacitor voltage control using fundamental frequency zero-sequence voltage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(10): 12134-12150.

[7] 唐成虹, 董存, 戴睿鹏, 等. 基于模型预测控制的光伏场站快速协同无功电压控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(17): 80-90.

TANG Chenghong, DONG Cun, DAI Ruipeng, et al. Fast cooperative reactive voltage control for photovoltaic stations based on model predictive control[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(17): 80-90.

[8] IBRAHIM A M, GAWISH S A, EL-AMARY N H, et al. STATCOM controller design and experimental investigation for wind generation system[J]. IEEE Access, 2019, 7: 150453-150461.

[9] 郑诗程, 徐礼萍, 郎佳红, 等. 基于重复 PI 控制和前馈控制的静止无功发生器[J]. 电工技术学报, 2016, 31(6):

- 219-225.
ZHENG Shicheng, XU Liping, LANG Jiahong, et al. Static var generator based on repetitive PI control and feedforward control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(6): 219-225.
- [10] 余攀, 孙建军, 查晓明, 等. 考虑电网不对称故障的链式 STATCOM 并网点电压前馈策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3112-3119.
YU Pan, SUN Jianjun, ZHA Xiaoming, et al. Grid voltage feed-forward strategy for cascaded STATCOM considering grid asymmetry faults[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3112-3119.
- [11] 陆道荣, 魏缪宇, 于宇, 等. 一种基于方波注入的星形级联静止同步补偿器的负序电流补偿策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(6): 1482-1494.
U Daorong, WEI Miaoyu, YU Yu, et al. Zero-sequence-voltage injection based on square-wave to balance cluster voltages for star-connected cascaded STATCOM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(6): 1482-1494.
- [12] 朱瑛, 饶军, 郭旭滨. 风电场无功补偿工况下级联 H 桥 STATCOM 电压平衡控制[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(21): 97-105.
ZHU Ying, RAO Jun, GUO Xubin. Voltage balance control of cascaded H-bridge STATCOM for wind farm under reactive power compensation condition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(21): 97-105.
- [13] 陆道荣, 沙辰星, 周骏贵, 等. 电网电压跌落下基于零序电压注入的星形级联 H 桥 STATCOM 相间直流电压均衡控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2924-2932.
LU Daorong, SHA Chenxing, ZHOU Jungui, et al. Zero-sequence-voltage-based cluster voltage balancing control under grid voltage sag for star-connected cascaded H-bridge STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2924-2932.
- [14] LIU Q X, RODRIGUEZ E, FARIVAR G G, et al. Discontinuous modulation of a cascaded H-bridge low-capacitance StatCom[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(3): 2790-2800.
- [15] 武稼祥, 张国澎, 艾永乐, 等. 一种改进的模块化 SVG 并联交错调制方式[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 26-33.
WU Jiexiang, ZHANG Guopeng, AI Yongle, et al. An improved modular SVG parallel interleaving modulation method[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 26-33.
- [16] 崔鹏, 郭春义, 蒋雯, 等. 基于二次型指标和蒙特卡洛方法的含 STATCOM 的 LCC-HVDC 系统的控制参数优化[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3858-3867.
CUI Peng, GUO Chunyi, JIANG Wen, et al. Optimization of control parameters of LCC-HVDC system with STATCOM based on Lyapunov stability and Monte Carlo algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 3858-3867.
- [17] BHUKYA J, MAHAJAN V. Parameter tuning of PSS and STATCOM controllers using genetic algorithm for improvement of small-signal and transient stability of power systems with wind power[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2021, 31(7): 1-33.
- [18] 陈磊, 郑燊聪, 蒋禹齐, 等. 基于改进混沌布谷鸟算法的风电场多机等值参数辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(20): 99-106.
CHEN Lei, ZHENG Shencong, JIANG Yuqi, et al. Identifying multi-machine equivalent parameters of wind farms based on an improved chaotic cuckoo search algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(20): 99-106.
- [19] 夏天华, 马骏超, 黄弘扬, 等. 基于 RTDS 硬件在环测试的 SVG 控制器参数辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 110-116.
XIA Tianhua, MA Junchao, HUANG Hongyang, et al. Parameter identification for SVG controller based on RTDS hardware-in-the-loop test[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 110-116.
- [20] 国家能源局. 风电场动态无功补偿装置并网性能测试规范: NB/T 10316—2019[S]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
- [21] 国家能源局. 风电机组电气仿真模型建模导则: NB/T 31066—2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.

收稿日期: 2024-01-05

作者简介:

夏楠(1988—), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统恢复策略、新能源建模; E-mail: pattyxianan@126.com

罗傲京(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为新能源建模与并网控制; E-mail: luaojing@163.com

晁璞璞(1990—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为新能源建模与并网控制。E-mail: pupuc@163.com

(编辑 姜新丽)