

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220680

基于虚拟同步发电机的固态变压器交流端口 柔性控制策略研究

程静¹, 赵振民^{1,2}

(1. 可再生能源发电与并网控制教育部工程研究中心(新疆大学), 新疆 乌鲁木齐 830017;
2. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 固态变压器(solid state transformer, SST)能实现传统电力变压器的变压、隔离作用, 还可实现灵活的电能调控作用, 但不具备传统同步发电机的机械特性及同步运行机制。当分布式电源经 SST 接入电网时, 由于其出力的随机性和波动性, 将对上级电网造成冲击, 导致电网电压/频率波动。提出一种基于虚拟同步发电机的 SST 交流端口控制策略。首先, 建立模块化多电平型输入级和同步发电机等效模型, 将虚拟同步发电机原理融入输入级控制策略, 以提高 SST 并网端口的电能质量、惯性及阻尼特性, 并使其具备参与电网调频、调压能力。其次, 提出储能装置辅助调频控制, 保障 SST 参与一次调频时低压系统负载功率消耗平衡。最后, 确立了输出级虚拟同步发电机控制策略, 以提高低压交流端口负荷功率响应特性, 实现 SST 对上级电网的友好性。在 Matlab/Simulink 平台搭建仿真模型, 验证了所提 SST 拓扑结构及其控制策略的正确性和有效性。

关键词: 虚拟同步发电机; 固态变压器; 分布式电源; 模块化多电平变换器; 控制策略

Flexible control strategy for a solid-state transformer AC port based on a virtual synchronous generator

CHENG Jing¹, ZHAO Zhenmin^{1,2}

(1. Engineering Research Center of Education Ministry for Renewable Energy Power Generation and Grid Connection, Xinjiang University, Urumqi 830017, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, China)

Abstract: A solid-state transformer (SST) can realize the voltage transformation and isolation of a traditional power transformer and flexible power regulation, but it does not have the mechanical characteristics and synchronous operation mechanism of a traditional synchronous generator. When distributed power generation is connected to the power grid through the SST, because of the randomness and power fluctuation of distributed power generation, it will impact the superior power grid and lead to grid voltage or frequency fluctuation. A control strategy for the SST AC port based on a virtual synchronous generator is proposed. First, the equivalent model of the modular multilevel input stage and synchronous generator is established, and the principle of the virtual synchronous generator is integrated into the input stage control strategy to improve the power quality, inertia, and damping characteristics of the SST grid connection port. It also gives it the ability to participate in power grid frequency regulation and voltage regulation. Second, auxiliary frequency modulation control of the energy storage device is proposed to ensure the balance of load power consumption of the low-voltage system when the SST participates in primary frequency modulation. Finally, the control strategy of output stage of the virtual synchronous generator is established to improve the load power response characteristics of the low-voltage AC port and realize the 'friendliness' of the SST to the superior power grid. The simulation model is established on the Matlab/Simulink platform to verify the correctness and effectiveness of the proposed SST topology and its control strategy.

This work is supported by Major Science and Technology Project of the Xinjiang Uygur Autonomous Region (No. 2022A01001-4).

Key words: virtual synchronous generator; solid state transformer; distributed generation; modular multilevel converter; control strategy

基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项资助(2022A01001-4); 新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题(2020D04048); 国家自然科学基金项目资助(52067020)

0 引言

近年来, 能源危机和环境污染问题受到国内外广泛关注, 风电、光伏等可再生能源得到迅猛发展^[1-5]。随着大规模分布式新能源和敏感性负荷接入电网^[6-7], 固态变压器作为一种具备多类型接口的智能高频高压变电力电子设备在配电网中得到大规模应用, 为分布式新能源提供灵活的并网接口^[8-12]。

文献[10]和文献[13]研究了直接电压控制和虚拟阻抗的控制方法, 有效改善了分布式电源功率波动下 SST 输出级电能质量, 但对并网端口的电能质量会有一定影响。文献[14]和文献[15]研究了基于内膜控制器的 SST 控制策略, 有效提高了系统的响应速度和抗扰动能力, 但负荷功率的频繁波动易对并网端口产生冲击, 且系统不具备参与电网调压、调频性能。

由以上文献可知, 常规控制策略下 SST 交流端口不具备传统同步发电机的惯性、阻尼特性和同步运行机制; 加之 SST 低压输出交流端口无大电网惯性支撑, 在配电网中分布式电源占比不断提高的背景下, 外界扰动易引发系统内部功率波动, 导致 SST 交流端口电能质量较差, 难以实现对上级电网的友好支撑, 对电力系统安全稳定运行造成严重不利影响^[16-17]。目前, 虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)技术可使配置储能装置的电力电子变换器模拟同步发电机的外特性, 并具备调压、调频能力^[18-21]。文献[22]研究了一种改进有功-频率环的 VSG 控制策略, 根据电网频率偏差大小调节机械功率, 有效提高了系统惯性和抗外界扰动能力。文献[23]研究了转动惯量和阻尼系数对分布式系统稳

定性的影响, 自适应地控制阻尼和惯量系数, 提升了系统功频特性。可见, VSG 控制技术的研究主要集中于分布式逆变电源领域^[24-25], 而鲜有基于 VSG 的 SST 柔性控制技术相关研究。

为此, 本文基于 VSG 控制原理, 提出一种 SST 交流端口柔性控制策略, 使 SST 具备同步发电机的特性, 依靠低压直流端口储能装置辅助调频控制, 使其参与上级电网一次调频的同时, 有效保障低压系统负载功率消耗平衡。此外, 通过输入级无功-电压控制为上级电网提供必要的无功支撑, 并有效提高 SST 交流端口的惯性和阻尼特性, 减小其内部功率波动对上级电网的影响和并网端口的电流畸变率, 实现与上级电网的友好性互联。

1 SST 主拓扑结构

本文采用三级型固态变压器主电路拓扑结构, 主要由输入级、隔离级、输出级组成, 如图 1 所示。输入级采用半桥型模块化多电平变换器, 将输入的中/高压交流转变为中/高压直流, 且可通过增减子模块数量适应于不同电压等级, 有效提高了功率密度和电能质量。隔离级由多个双有源桥串联谐振变换器以输入串联/输出并联的结构连接, 实现直流电压变换及电气隔离, 高/低压直流母线可分别为规模化/分布式新能源或负荷提供直流端口。输出级交流端口采用 T 型三电平型变换器, 相较于传统两电平型变换器其具有较低的谐波含量和功率损耗, 适用于低压大电流场合^[26-27], 将低压直流转变为稳定的三相工频电压。输出级直流端口采用 Buck-Boost 型 DC/DC 变换器, 以接入直流负载或直流型分布式电源。

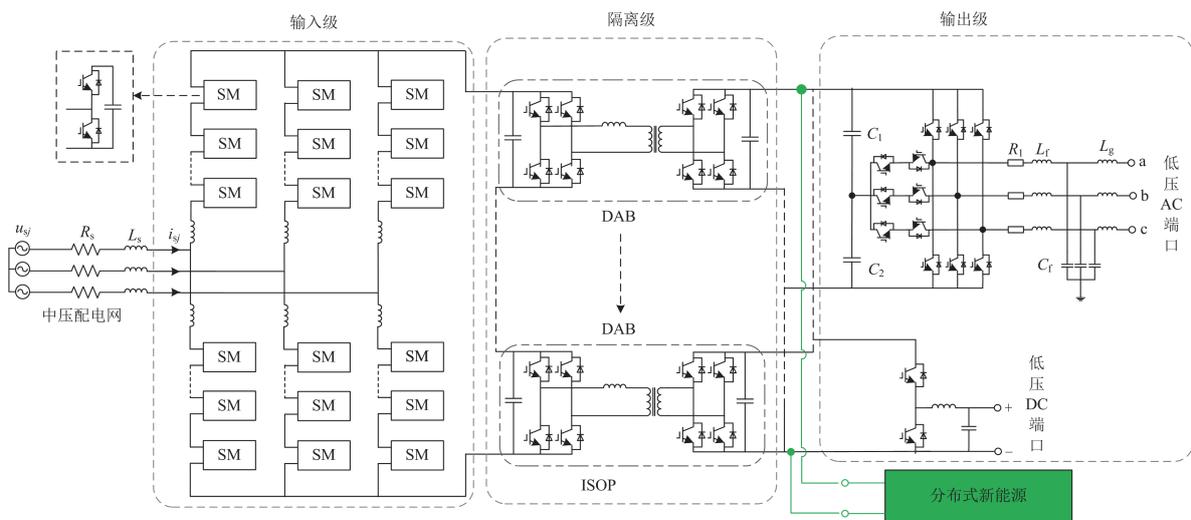


图 1 SST 主电路拓扑结构图

Fig. 1 SST main circuit topology

2 控制策略设计

2.1 MMC 输入级与 VSG 等效模型

为便于分析, MMC 型输入级等效电路如图 2 所示。 u_{sk} 和 i_{sk} ($k = a, b, c$) 分别为输入级交流端口电压和电流; u_{pk} 、 i_{pk} 和 u_{nk} 、 i_{nk} 分别为 MMC 上、下桥臂流过的电压和电流; R_s 、 L_s 分别为输入级交流端口上的等效电阻和滤波电感; L 、 R 分别为上下桥臂电感、电阻; U_{dcH} 、 I_{dcH} 分别为输入级直流侧中压直流电压、电流。

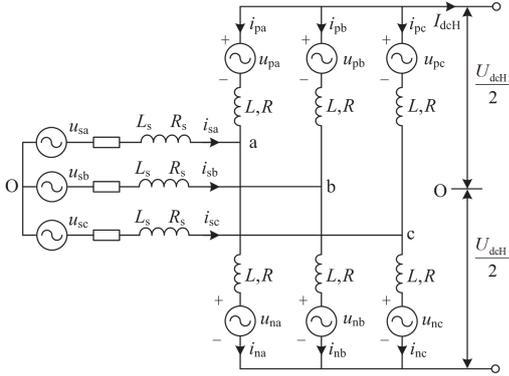


图 2 MMC 输入级等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of MMC input level

输入级交流侧电流关系为

$$i_{sk} = i_{nk} - i_{pk} \quad (1)$$

由基尔霍夫电压定律, 得模块化多电平输入级电压方程为

$$u_{sk} = \frac{u_{nj} - u_{pj}}{2} + \left(R_s + \frac{1}{2}R\right)i_{sk} + \left(L_s + \frac{1}{2}L\right)\frac{di_{sk}}{dt} \quad (2)$$

输入级作为固态变压器和中压配电网电能转换和传输的端口, 也是实现与中压配电网友好交互的重要模块。基于虚拟同步发电机原理, 输入级可模拟传统同步发电机的惯性、阻尼特性及调压、调频特性, 其 VSG 等效电磁方程为

$$L_1 \frac{di_k}{dt} = -R_1 i_k + u_k - e_k \quad (3)$$

由式(2)和式(3)可得输入级与 VSG 的等效关系为

$$\begin{cases} L_1 = L_0 = L_s + \frac{L}{2} \\ R_1 = R_0 = R_s + \frac{R}{2} \\ i_k = i_{sk} \\ u_k = u_{sk} \\ e_k = u_{ck} = \frac{u_{nk} - u_{pk}}{2} \end{cases} \quad (4)$$

2.2 输入级 VSG 控制策略

同步发电机机械转子自身具备惯性和阻尼, 具有较强的暂态稳定性, 当电网遭受外界扰动时, 会引起功率失衡, 但不会即刻发生频率振荡。由同步发电机转子运动方程可得 SST 输入级交流端口有功-频率控制方程如式(5)。

$$\begin{cases} J\omega \frac{d\Delta\omega}{dt} = P_0 - P_c - D\omega(\omega - \omega_g) \\ \Delta\omega = \omega - \omega_g \\ \delta = \int \omega dt \end{cases} \quad (5)$$

式中: J 为转动惯量; D 为阻尼系数; ω 为同步发电机机械角速度; ω_g 为电网额定角速度(通常 ω_g 取值为 100π); δ 为同步发电机功角; P_0 为额定功率; P_c 为电磁功率。

通过控制输入级直流侧电容电压以追踪输出级负载功率, 输入级可自适应获取额定功率 P_0 。

$$P_0 = \left(K_{p1} + \frac{K_{i1}}{s}\right)(U_{dcH}^* - U_{dcH})U_{dcH}^* \quad (6)$$

式中: K_{p1} 、 K_{i1} 分别为直流电压环 PI 控制器的比例、积分参数; U_{dcH}^* 为中压直流母线电压参考值。

在输入级有功-频率控制方程中加入自适应调频环节, 由频率差可得功率修正量 P_f , SST 可参与电网频率调节。

$$P_f = 2\pi k_f (f - f_g) \quad (7)$$

式中: f 为虚拟同步发电机跟踪电网频率; f_g 为电网频率参考值; k_f 为调差系数。

输入级机械功率 P_m 如式(8)所示。

$$P_m = P_0 + P_f \quad (8)$$

综上, SST 输入级 VSG 有功-频率控制环如图 3 所示。

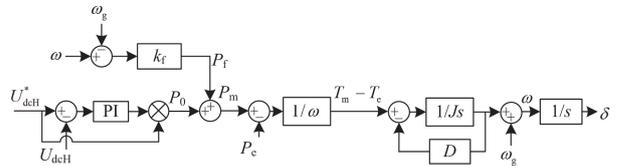


图 3 有功-频率控制框图

Fig. 3 Block diagram of active power-frequency control

控制输入级 VSG 虚拟电势 E_p , 实现对无功功率偏差量和端电压幅值偏差量的调节, 如式(9)所示。

$$E_p = \left(K_{p2} + \frac{K_{i2}}{s}\right)[k_q(Q_{set} - Q_c) + (U_0 - U_m)] \quad (9)$$

式中: K_{p2} 、 K_{i2} 分别为 PI 控制器的比例、积分系数;

Q_{set} 为无功功率设定值; Q_c 为输入级交流端口瞬时无功功率; k_q 为无功跟踪系数; U_0 、 U_m 分别为输入级交流侧端电压幅值参考值和实际值。

无功-电压控制环如图 4 所示, 无功-电压控制环输出虚拟电势幅值 E_p , 有功-频率控制环输出功角 δ 。

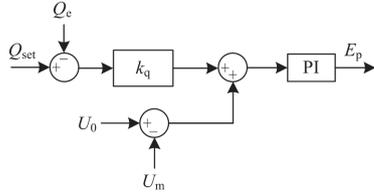


图 4 无功-电压控制框图

Fig. 4 Block diagram of reactive power-voltage control

将虚拟同步发电机功率控制作为外环, 电压、电流控制作为内环。在 d 、 q 同步旋转坐标系下设计电压、电流控制器, 二者均采用 PI 控制, 加入 d 、 q 轴电流解耦环节, 以有效提高系统动态响应特性。将 E_p 作为输入级交流端口 d 轴参考电压 u_{sd}^* , q 轴电压参考值 u_{sq}^* 设定为 0, 输出功角 δ 作为坐标变换的旋转角度。此外, 为抵消输入级和电网电能传输过程中线路阻抗引起的功率耦合, 引入虚拟电阻 R_v 和虚拟电感 L_v , 叠加在 u_{sd}^* 和 u_{sq}^* 上, 以实现功率解耦。

输入级基于 VSG 的控制结构框图如图 5 所示。

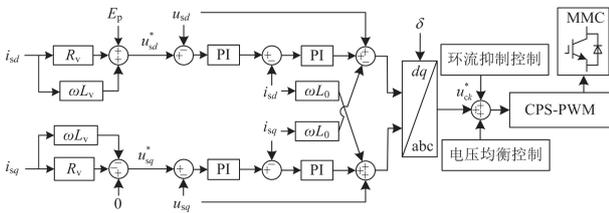


图 5 输入级 VSG 控制框图

Fig. 5 Block diagram of input level VSG control

2.3 输出级 VSG 控制策略

输出级有功-频率控制环与输入级 VSG 控制相似, 其有功-频率方程为

$$\begin{cases} J_1 \omega_1 \frac{d(\omega_1 - \omega_0)}{dt} = P_{01} - P_{c1} - D_1 \omega_1 (\omega_1 - \omega_0) \\ \delta_1 = \int \omega_1 dt \end{cases} \quad (10)$$

式中: J_1 、 D_1 分别为输出级惯量和阻尼系数; ω_1 、 ω_0 分别为实际角速度和额定角速度(取 $\omega_0 = 100\pi$); P_{01} 、 P_{c1} 分别为输出级交流端口额定功率和瞬时功率; δ_1 为功角。

相比于输入级 VSG 控制, 输出级 VSG 控制策

略也采用相同的机械转子运动方程, 以提高频率的暂态稳定特性。但是, 输出级输出有功功率大小主要由负载决定, 其额定有功 P_{01} 由跟踪的输出级负载所需功率确定; 在有功-频率控制环中加入频率下垂控制, 由频率偏差得到频率修正量 P_{f1} , 输出级机械功率 $P_{m1} = P_{01} + P_{f1}$ 。有功-频率控制环如图 6 所示, 图中 k_{f1} 为频率调节系数。

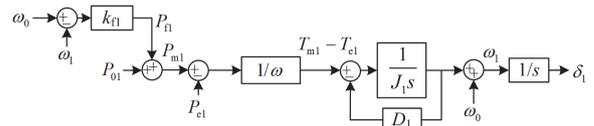


图 6 有功-频率控制框图

Fig. 6 Block diagram of active power-frequency control

固态变压器输出级处于离网状态, 其输出无功仍由负载需求决定。无功-电压控制方程为

$$E_{p1} = U_{01} + k_{q1}(Q_{set1} - Q_{c1}) \quad (11)$$

式中: E_{p1} 、 U_{01} 分别为输出级交流端口虚拟电势和电压参考值; k_{q1} 为无功下垂系数; Q_{set1} 、 Q_{c1} 分别为输出级交流端口无功功率给定值和瞬时值。无功-电压控制环如图 7 所示。

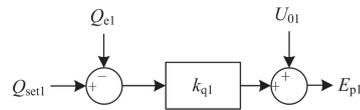


图 7 无功-电压控制框图

Fig. 7 Block diagram of reactive power-voltage control

由式(10)和式(11), 可得输出级交流端电压参考值 u_{zj}^* ($j = a, b, c$)。

$$\mathbf{u}_{zj}^* = \begin{bmatrix} u_{za}^* \\ u_{zb}^* \\ u_{zc}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{p1} \sin(\delta_1) \\ E_{p1} \sin(\delta_1 - 2\pi/3) \\ E_{p1} \sin(\delta_1 + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (12)$$

为提高输出级输出电压、电流质量以及动态响应性能, 设计了电压、电流内环控制, 实现对电压和电流的实时跟踪。将 VSG 功率环输出的端电压参考值 u_{zj}^* 分解成 d 、 q 分量 u_{zd}^* 、 u_{zq}^* , 作为输出级交流端电压 d 、 q 轴分量 u_{gd} 、 u_{gq} 的参考值, 通过电压环控制得到 d 、 q 轴输出参考电流分量 i_{gd}^* 、 i_{gq}^* 。考虑滤波电容分流的影响, 引入虚拟电容, 获得电容电流 i_{cd}^* 、 i_{cq}^* , 与 i_{gd}^* 、 i_{gq}^* 叠加形成电流环内电感电流参考值 i_{ld}^* 、 i_{lq}^* , 结合实际电流 i_{ld} 、 i_{lq} 可得电压调制信号。虚拟电容电流参考值和电压环控制方程如式(13)和式(14)所示。

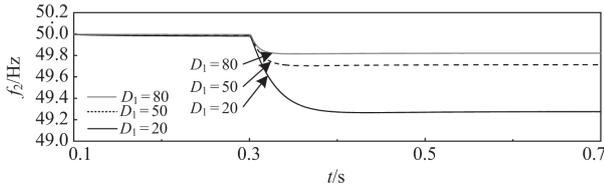
(b) 惯量参数($J_1=0.5$)

图 11 输出级 VSG 频率响应曲线

Fig. 11 Response curves of output stage VSG frequency

4 算例分析及仿真验证

在 Matlab/Simulink 平台搭建虚拟同步发电机控制的 SST 仿真模型, 验证 VSG 控制策略的有效性。SST 输入输出级参数设置如表 1 和表 2 所示。

表 1 输入级参数设置

Table 1 Input level parameter setting

参数	数值	参数	数值
上桥臂子模块数	10	虚拟惯量	0.2
子模块电容/mF	10	虚拟阻尼	50
桥臂电感/mH	30	自适应调频系数	6369
虚拟电感/mH	6	无功调节系数	0.05
虚拟电阻/ Ω	0.001	直流母线电容/mF	1000

表 2 输出级参数设置

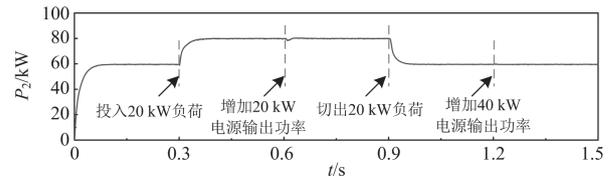
Table 2 Output level parameter setting

参数	数值	参数	数值
滤波电感/mH	3	虚拟阻尼	50
滤波电容/ μ F	10	频率调节系数	2000
等效电阻/ Ω	0.08	无功调节系数	0.001
分压电容/ μ F	4700	直流母线电容/mF	1000
虚拟惯量	0.5	储能参与调频系数	40

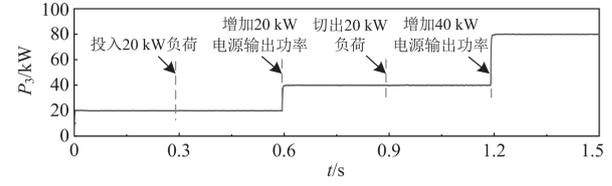
中压交流端口并网线电压有效值为 10 kV, 中压直流母线电压为 16 kV, 低压直流母线电压为 750 V, 低压交流端口输出线电压有效值为 380 kV。

4.1 交流端口功率响应特性

分析验证在中压配电网稳定条件下, 基于 VSG 控制的 SST 输入输出级交流端口的功率响应特性。变换 SST 输出级负荷和直流分布式电源功率, 观察各端口变量的响应特性。在 $[0, 0.3]$ s 时段, 输出级交流端口负荷功率为 60 kW, 分布式电源输出功率为 20 kW; 0.3 s 时, 投入 20 kW 负荷; 0.6 s 时, 将电源输出功率增加 20 kW; 0.9 s 时, 切出 20 kW 负荷; 1.2 s 时, 电源输出功率增加 40 kW。输出级低压交直流端口负荷功率曲线如图 12 所示, 输入级中压交流端口电流和频率曲线如图 13 所示, 其功率响应特性仿真结果如图 14 所示, 中压直流母线电压如图 15 所示。



(a) 交流端口负荷功率需求



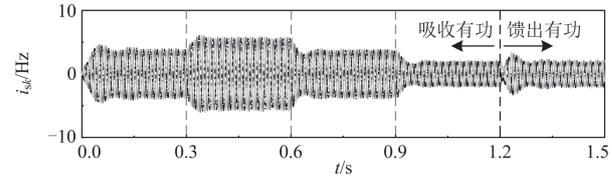
(b) 直流端口分布式电源功率

图 12 输出级低压交直流端口负荷功率曲线

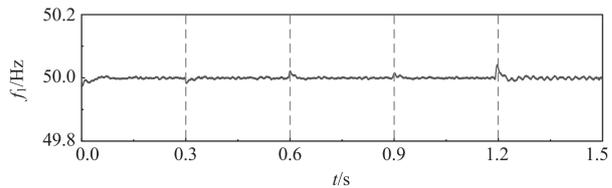
Fig. 12 Simulation curves of output level low voltage

AC/DC port load power

由图 12(a)可知, 当负载功率突变时, 输出级交流端口输出功率及时响应, 并保持缓慢平滑变化, 表明输出级 VSG 交流端口具备一定的惯性, 保障 SST 功率稳定。由图 12(b)可知, 输出级直流端口分布式电源输出功率突变时, 直流端口功率阶跃式变换。



(a) 并网电流



(b) 频率

图 13 输入级中压交流端口电流和频率曲线

Fig. 13 Current and frequency curves of medium

voltage AC port of input level

图 13 中, 在 $[0, 0.3]$ s 时段, 并网电流谐波含量为 3.49%; 在 $[0.3, 0.6]$ s 时段, 谐波含量为 2.92%; 在 $[0.6, 0.9]$ s 时段, 谐波含量为 3.9%; 在 $[0.9, 1.2]$ s 时段, 谐波含量为 4.31%; 在 $[1.2, 1.5]$ s 时段, 谐波含量为 4.73%。由图 12 和图 13(a)可知, 输入级 VSG 控制级联电压/电流双闭环, 其并网端口电流实现了无静差跟踪。在 1.2 s 时刻前, SST 输入级吸收中压配电网有功, 1.2 s 后则向中压配电网馈送有功, 表明 SST 可依据输出级端口功率的盈亏, 与中压配电网

网进行功率交换，且在运行过程中输入级并网电流能够及时响应并保持良好的电流质量。由图 13(b)可知，当输出级交直流端口功率突变时，频率在 0.08% 范围内波动且调节时间很短，进一步验证了输入级交流端口具有良好的电能质量。

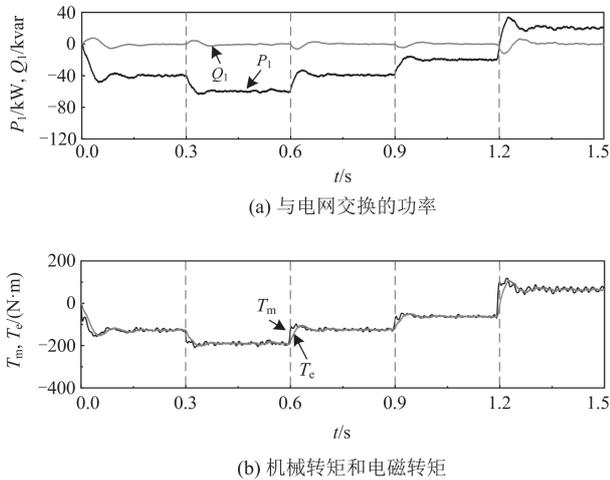


图 14 输入级中压交流端口功率响应特性曲线
Fig. 14 Power response characteristics curves of the input level medium voltage AC port

由图 14(a)结合图 12 可知，在[0, 0.3] s 时段，输出级功率缺额 40 kW，输入级吸收中压配电网有功 40 kW；在[0.3, 0.6] s 时段，输出级功率缺额 60 kW，输入级吸收电网功率增至 60 kW；在[0.6, 0.9] s 时段，输出级功率缺额 40 kW，输入级吸收电网功率降至 40 kW；在[0.9, 1.2] s 时段，输出级功率缺额 20 kW，输入级吸收电网功率降至 20 kW；在[1.2, 1.5] s 时段，输出级功率盈余 20 kW，输入级馈送至中压配电网功率 20 kW。充分表明：输入级 VSG 机械功率以直流电压环控制，可及时响应输出端口负载功率需求，缓慢平滑地变化，有效增强输入级中压交流端口惯性，在满足输出级负载功率需求的同时，保障与上级电网进行平稳的功率交换。由图 14(b)可见，在惯性和阻尼作用下，电磁转矩缓慢平滑地跟踪机械转矩。

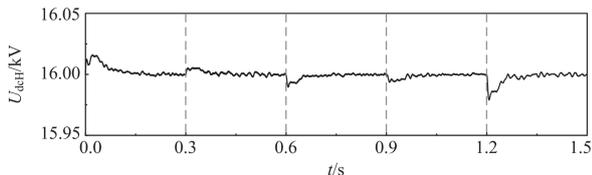


图 15 中压直流母线电压
Fig. 15 Medium voltage DC bus voltage

由图 15 可知，在输出级交直流端口功率变化过程中，中压直流母线电压能较好地保持稳定，波

动范围在 0.16% 内，且能快速恢复稳态值，有效保障后续电路的电能质量。

综上可知，基于 VSG 控制的 SST 能有效提升中低压交流端口惯性和阻尼特性，在保障低压系统稳定运行的同时，增强了中压交流端口对配电网的友好性，具有良好的电能质量。

4.2 电压调节能力

输入级 VSG 无功-电压调节效果如图 16 所示，在[0.3, 0.8] s 时段，SST 向配电网馈送 16 kvar 无功；在[1.2, 1.7] s 时段，SST 从配电网吸收 16 kvar 无功。

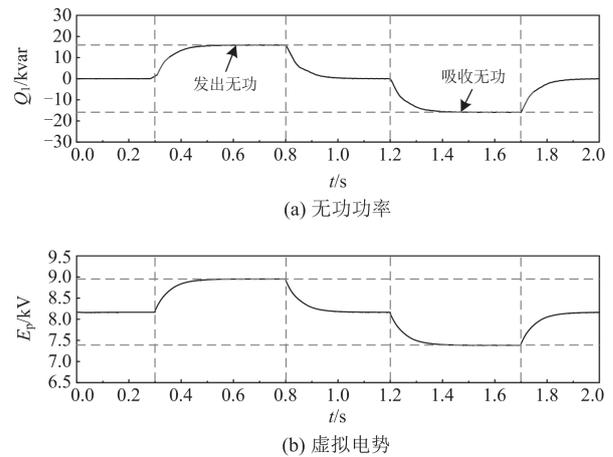


图 16 输入级 VSG 无功-电压调节

Fig. 16 Input level VSG reactive power-voltage regulation

由图 16 可知，初始时刻输入级 VSG 虚拟电势为 8.165 kV；从 0.3 s 开始，随 SST 向配电网输出无功逐渐增大至 16 kvar，VSG 虚拟电势也逐渐升高至 8.952 kV，高于原稳态值；持续 0.5 s 后，SST 向配电网输出无功逐渐降低，在 1 s 左右恢复为 0 kvar，虚拟电势同步恢复至原稳态值；在 1.2 s 时，随 SST 从配电网中吸收无功至 16 kvar，虚拟电势开始逐渐降低，在 1.3 s 左右降至 7.378 kV，小于原稳态值；持续 0.5 s 后，无功恢复至 0 kvar，虚拟电势同步恢复至 8.165 kV。分析表明：当输入级并网电压幅值发生波动时，通过控制 SST 与电网的无功交换，相应地调节虚拟电势，实现对电网电压的调节，即：SST 输入级 VSG 可灵活控制无功功率，具备对中压配电网电压调节的能力。

4.3 一次调频能力

分析验证低压直流端口储能装置为 SST 参与中压配电网频率调节提供功率支撑，满足输出级负载功率需求。起始时刻负载功率为 60 kW，在保持输出级端口功率稳定的前提下，在 0.3 s 时，电网频率下降 0.5 Hz，持续 0.5 s 后恢复至 50 Hz，如图 17(a)所示。SST 一次调频仿真结果如图 17(b)—图 17(d)所示。

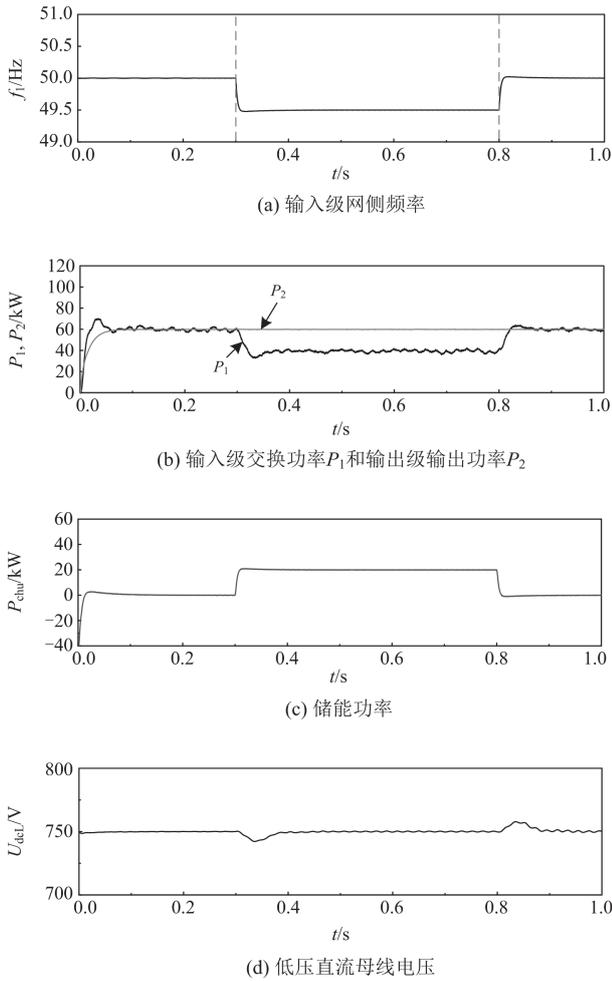


图 17 SST 一次调频仿真结果

Fig. 17 SST primary FM simulation results

由图 17(b)和图 17(c)可见, 当电网频率稳定在 50 Hz 时, SST 输入级与电网的交换功率 P_1 等于输出级交流端口所需功率 P_2 , 此时储能释放功率为零; 当电网频率下降 0.5 Hz 时, 输入级参与电网调频, 与电网交换功率 P_1 减少 20 kW, 输出级交流端口负载功率 P_2 仍保持 60 kW, 需控制储能装置弥补输入级参与电网调频产生的有功缺额, 以满足输出级端口负载功率消耗, 此时储能释放功率 20 kW; 0.5 s 后频率恢复至 50 Hz, P_1 重新跟踪负载功率并恢复至 60 kW, 储能释放功率为零。由图 17(d)可知, 在运行过程中, 低压直流母线电压仅在频率跌落和恢复时产生 1.03% 的幅值波动, 符合电能质量供电电压允许偏差要求(10 kV 及以下供电电压允许偏差为额定电压的 $\pm 7\%$ ^[28]), 有效保障输出级输出电能质量。

以上分析表明, 基于 VSG 控制的 SST, 在参与中压配电网频率调节时, 可灵活控制直流端口储能

装置补偿功率缺额, 保障低压系统负载功率平衡。

5 结论

本文针对固态变压器输入级和输出级交流端口, 提出基于虚拟同步发电机控制策略, 有效提高了 SST 交流端口机械特性和同步运行特性。在此基础上, 低压直流端口配置储能以辅助 SST 参与中压配电网的一次调频, 以实现 SST 与中压配电网的友好互联, 经仿真验证得到以下结论:

1) 提出的 SST 输入级 VSG 控制策略, 使中压交流端口模拟传统同步发电机的惯性和阻尼特性, 提高了交流端口柔性和电能质量; 且具有良好的功率跟踪能力, 降低了 SST 内部功率不稳定对中压配电网的影响, 实现 SST 与中压配电网的柔性互联。

2) 在低压直流端口配置储能, 为 SST 参与中压配电网一次调频提供功率支撑, 满足负载功率需求; 同时, 通过灵活控制无功功率, 具备参与中压配电网电压调节的能力。

3) 提出的 SST 输出级 VSG 控制策略, 在交流负载功率频繁突变时, 有效提高了低压交流端口功/频响应稳定性, 以保障 SST 功率稳定性, 进一步提高了其抗负载扰动性能。

参考文献

- [1] 胡鞍钢. 中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 1-15.
HU Angang. China's goal of achieving carbon peak by 2030 and its main approaches[J]. Journal of Beijing University of Technology (Social Science Edition), 2021, 21(3): 1-15.
- [2] 臧紫坤, 杨晓辉, 李昭辉, 等. 考虑储热改造与最优弃能的风光火储低碳经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 33-43.
ZANG Zikun, YANG Xiaohui, LI Zhaohui, et al. Low-carbon economic scheduling of solar thermal storage considering heat storage transformation and optimal energy abandonment[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 33-43.
- [3] 李征, 王文宾, 韩胜峰, 等. 考虑无功支撑的分布式光伏接入配电网电压适应性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 32-41.
LI Zheng, WANG Wenbin, HAN Shengfeng, et al. Voltage adaptability of distributed photovoltaic access to a distribution network considering reactive power support[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 32-41.
- [4] 盛万兴, 吴鸣, 季宇, 等. 分布式可再生能源发电集群并网消纳关键技术及工程实践[J]. 中国电机工程学报,

- 2019, 39(8): 2175-2186.
- SHENG Wanxing, WU Ming, JI Yu, et al. Key techniques and engineering practice of distributed renewable generation clusters integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2175-2186.
- [5] 张鑫, 李媛媛, 吉平. 含高比例可再生能源的交直流混联电网规划方法[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(4): 372-381.
- ZHANG Xin, LI Yuanyuan, JI Ping. A planning approach for AC/DC hybrid power grid with high proportion of renewable energy[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(4): 372-381.
- [6] 赵福林, 俞啸玲, 杜诗嘉, 等. 计及需求响应的含大规模风电并网下电力系统灵活性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 42-51.
- ZHAO Fulin, YU Xiaoling, DU Shijia, et al. Assessment on flexibility of a power grid with large-scale wind farm integration considering demand response[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 42-51.
- [7] 陈泽雄, 张新民, 王雪峰, 等. 分布式光伏电站接入配电网的分布鲁棒优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(13): 30-42.
- CHEN Zexiong, ZHANG Xinmin, WANG Xuefeng, et al. A distributionally robust optimal allocation method for distributed photovoltaic generation stations integrated into a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(13): 30-42.
- [8] 李子欣, 高范强, 赵聪, 等. 电力电子变压器技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1274-1289.
- LI Zixin, GAO Fanqiang, ZHAO Cong, et al. Research review of power electronic transformer technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1274-1289.
- [9] 王优, 郑泽东, 李永东. 中高压电力电子变压器拓扑与控制应用综述[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(5): 1-10.
- WANG You, ZHENG Zedong, LI Yongdong. Review of topology and control application of medium and high voltage power electronic transformer[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering, 2017, 36(5): 1-10.
- [10] 涂春鸣, 肖凡, 兰征, 等. 微电网中电力电子变压器的电压质量控制策略研究[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(6): 1-9.
- TU Chunming, XIAO Fan, LAN Zheng, et al. Study on voltage quality control strategy of power electronic transformers in microgrid[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering, 2018, 37(6): 1-9.
- [11] 卢林煜, 王鲁杨, 恽东军, 等. 基于柔性配电网级联 H 桥固态变压器电压与功率均衡控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(1): 152-159.
- LU Linyu, WANG Luyang, YUN Dongjun, et al. Research on voltage and power balance control strategy of cascaded H-bridge solid state transformer based on flexible distribution networks[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(1): 152-159.
- [12] 王磊, 程鹏. 光储一体化系统三级互联隔离型电力电子变压器研究[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(7): 136-146.
- WANG Lei, CHENG Peng. Research on three-level interconnected isolated power electronic transformers for integrated optical storage system[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(7): 136-146.
- [13] 刘尧, 林超, 陈滔, 等. 基于自适应虚拟阻抗的交流微电网无功功率—电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 16-21, 133.
- LIU Yao, LIN Chao, CHEN Tao, et al. Reactive power-voltage control strategy of AC microgrid based on adaptive virtual impedance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 16-21, 133.
- [14] MONIK M, MESHRAM R, WAGH S. Internal model control of solid state transformer for microgrid stability enhancement[J]. North American Power Symposium (NAPS), 2017, 50(8): 1-6.
- [15] 韩继业, 李勇, 曹一家, 等. 基于模块化多电平型固态变压器的新型直流微网架构及其控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 733-740.
- HAN Jiye, LI Yong, CAO Yijia, et al. A new DC microgrid architecture based on MMC-SST and its control strategy[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 733-740.
- [16] 张明锐, 宋柏慧, 王佳莹, 等. 基于模型预测控制的固态变压器控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 129-137.
- ZHANG Mingrui, SONG Baihui, WANG Jiaying, et al. Research on solid-state transformer control strategy based on model predictive control[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 129-137.
- [17] SHAMSHUDDIN M A, ROJAS F, CARDENAS R, et al. Solid state transformers: concepts, classification, and control[J]. Energies, 2020, 13(9): 1897-1912.
- [18] 和萍, 李钊, 李从善, 等. 基于虚拟同步机技术的储能机电暂态特性建模[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 11-21.
- HE Ping, LI Zhao, LI Congshan, et al. Electromechanical transient modeling of energy storage based on virtual synchronous machine technology[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 11-21.
- [19] 艾欣, 谭骞, 吕志鹏, 等. VSG 结合无源型能量路由器及其在微网中的应用[J]. 华北电力大学学报(自然科学

- 版), 2018, 45(3): 1-9.
- AI Xin, TAN Qian, LÜ Zhipeng, et al. VSG with PBC energy router and its application in microgrid[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2018, 45(3): 1-9.
- [20] 董存, 陶以彬, 张牟发, 等. 基于虚拟同步发电机的逆变器类电源频率特性及重塑技术[J]. 电力建设, 2022, 43(2): 109-116.
- DONG Cun, TAO Yibin, ZHANG Moufa, et al. Frequency characteristics and reshaping technology for inveter-based generators based on virtual synchronous generator[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(2): 109-116.
- [21] 张义, 胡正阳, 彭佩佩, 等. 基于极点配置的新能源并网附加阻尼控制策略[J]. 中国电力, 2021, 54(10): 217-222.
- ZHANG Yi, HU Zhengyang, PENG Peipei, et al. Pole assignment based auxiliary damping control for renewable generation integrated into power system[J]. Electric Power, 2021, 54(10): 217-222.
- [22] 邢鹏翔, 付立军, 王刚, 等. 改善微电网频率动态响应的虚拟同步发电机强化惯量控制方法[J]. 高电压技术, 2018, 44(7): 2346-2353.
- XING Pengxiang, FU Lijun, WANG Gang, et al. Control strategy of virtual synchronous generator with enhanced inertia for improving dynamic frequency response of microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2346-2353.
- [23] 杨赩, 梅飞, 张宸宇, 等. 虚拟同步发电机转动惯量和阻尼系数协同自适应控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 125-131.
- YANG Yun, MEI Fei, ZHANG Chenyu, et al. Coordinated adaptive control strategy of rotational inertia and damping coefficient for virtual synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 125-131.
- [24] 徐靖, 赵霞, 罗映红. 氢燃料电池并入微电网的改进虚拟同步机控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 165-172.
- XU Jing, ZHAO Xia, LUO Yinghong. Improved virtual synchronous generator control for hydrogen fuel cell integration into a microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 165-172.
- [25] 吴鸣, 吕振宇, 宋振浩, 等. 独立型虚拟同步化微电网分布式无功-电压二级控制策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 55(5): 1-13.
- WU Ming, LÜ Zhenyu, SONG Zhenhao, et al. Distributed reactive power-voltage secondary control strategy of independent virtual synchronization technology-based microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 55(5): 1-13.
- [26] 郑诗程, 胡青松, 彭勃. T型三电平拓扑及其中点电位平衡控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(12): 63-68.
- ZHENG Shicheng, HU Qingsong, PENG Bo. T-type three-level topology and control strategy for its neutral-point voltage balance[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(12): 63-68.
- [27] RONG Jingguo, AI Xin. Research on the structure and control strategy of a novel power electronic transformer for AC/DC hybrid distribution network[J]. Applied Sciences, 2019, 9(4): 727-739.
- [28] 国家电力监管标准化委员会. 电能质量供电电压允许偏差: GB/ 12325-90[S]. 北京: 中华人民共和国技术监督局, 1990.
- State Electricity Regulatory Commission of People's Republic of China. Allowable deviation of supply voltage for electrical energy quality: GB/ 12325-90[S]. Beijing: Technical Supervision Bureau of the People's Republic of China, 1990.

收稿日期: 2022-05-09; 修回日期: 2022-07-13

作者简介:

程 静(1980—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为新能源发电与并网控制。E-mail: 157511515@qq.com

(编辑 魏小丽)