

弱电网下采用 SVC 与 SVG 补偿后 新能源并网变换器的功率传输特性分析

康勇, 林新春*, 潘辰, 刘文斌

(强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北省 武汉市 430074)

Analysis of Power Transmission Characteristics of Renewable Energy Grid-connected Converter Considering SVC and SVG Compensation Under Weak Grid Condition

KANG Yong, LIN Xinchun*, PAN Chen, LIU Wenbin

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology

(Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: When the large-scale renewable energy is connected to the power grid, the reactive power consumption of the weak current network will lead to voltage drop of its parallel network. To ensure the effective delivery of renewable energy, static var compensator/static var generator(SVC/SVG), and other reactive power compensation devices will be centrally connected to the common coupling point(PCC). However, it is not clear how much the reactive power compensation device improves the power transmission capacity of the renewable energy grid-connected converter under the condition of weak grid and the influencing factors. In this paper, the renewable energy grid-connected converter was taken as the research object. Firstly, its power transmission characteristics when it is connected to the weak grid without considering reactive compensation were analyzed, and the formation mechanism and key factors of the limit output power of renewable energy grid-connected converter were discussed. Secondly, the working mechanism of two kinds of typical reactive power compensation devices(SVC and SVG) was analyzed, the power transmission characteristics of renewable energy grid-connected converter considering reactive power compensation were studied, and the constraint relationship between its limit the output power and short circuit ratio(SCR), the capacity of reactive power compensation device, and type of reactive power compensation device was analyzed. Finally, Matlab/Simulink simulation was used to verify the correctness of the theoretical analysis.

KEY WORDS: renewable energy grid-connected converter;

static var compensator; static var generator; power transmission characteristic

摘要: 在大规模新能源集中接入电网时, 因弱电网线路的无功消耗会导致新能源并网点电压下降。为保证新能源的有效送出, 在新能源并网点会集中接入 SVC/SVG 等无功补偿装置。然而, 无功补偿对新能源并网变换器在弱电网条件下功率传输能力的提升力度及关键影响因素尚不明确。该文以新能源并网变换器为研究对象, 首先分析它在不考虑无功补偿条件下并入弱电网时的功率传输特性, 并重点探讨其极限输出功率的形成机理及其关键影响因素; 其次, 分析所接入的 2 种典型无功补偿装置(静止无功补偿器(static var compensator, SVC)和静止无功发生器(static var generator, SVG))的工作机理, 研究考虑无功补偿后新能源并网变换器的功率传输特性, 并分析其极限输出功率与短路比、无功补偿装置容量、无功补偿装置类型的约束关系; 最后, 通过 MATLAB/Simulink 仿真验证论文理论分析的正确性。

关键词: 新能源并网变换器; 静止无功补偿器; 静止无功发生器; 功率传输特性

0 引言

能源危机已成为世界各国不得不面临的重大挑战, 新能源逐渐成为传统能源的重要替代方式。在中国, 太阳能、风能等新能源资源主要集中在东北、华北、西北等偏远地区, 电网架构薄弱, 常规同步发电容量较小, 大规模新能源集中接入电网末端, 使得新能源并网点处呈现弱电网特性。在光伏并网发电和直驱风力发电系统中, 新能源并网变换器作为新能源送出的并网装置, 其功率传输能力直接决定太阳能和风能的送出容量^[1-3]。

当新能源并网变换器向弱电网输出有功功率

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0902000); 国家电网公司科技项目(SGXJ0000KXJS1700841)。

National Key R&D Program of China(2017YFB0902000); Science and Technology Project of State Grid(SGXJ0000KXJS1700841)。

locked loop, PLL)定向在 PCC 电压矢量 U_t 上, dq 轴以电网基波频率 ω 逆时针旋转。图中 θ_{PLL} 为 PLL 的输出相角, ϕ 为并网电流 I 滞后 U_t 的相角, δ_t 为电网电压 U_g 滞后 U_t 的角度, I_d 、 I_q 分别为并网电流 I 的有功分量和无功分量。

由图 1 给出的新能源并网变换器的有功控制环路可知:控制系统通过直流电压外环(PI_{dc} 为控制器)与有功电流内环(PI_I 为控制器)分别实现直流电容电压 U_{dc} 对指令值 U_{dcref} 、交流侧输出有功电流 I_d 对电流指令值 I_{dref} 的跟踪。本文暂不考虑新能源并网变换器自身的无功补偿作用并假定控制器均处于理想状态,所以后文分析中认为 $I_q=I_{qref}=0$ 。由图 1 可知,新能源并网变换器交流侧电流是受控的,因此可以将其交流侧等效为一个受控电流源。在忽略电网侧动态的条件下,可以得到新能源并网变换器并入弱电网时的交流侧等效电路如图 3 所示(图中 $X_g = \omega L_g$)。

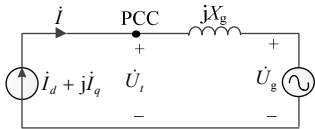


图 3 新能源并网变换器并入弱电网的交流侧等效电路
Fig. 3 Equivalent AC-side circuit of grid-connected converter connected with weak grid

锁相环的目标是将 d 轴定向在 PCC 电压 $\dot{U}_t$ 上,在忽略锁相环动态后可以认为 d 轴与 $\dot{U}_t$ 重合,电网电压 $\dot{U}_g$ 滞后 $\dot{U}_t$ 的角度为 δ_t ,由图 2 中所示的矢量关系可以得到 $\dot{U}_t$ 的幅值表达式^[1]:

$$U_t = \sqrt{U_g^2 - I_d^2 X_g^2} - I_q X_g \tag{1}$$

如果忽略 PLL 动态,那么 $\dot{U}_t$ 在 q 轴上分量为 0,此时新能源并网变换器交流侧输出的有功功率 P_{out} 可表示为:

$$P_{out} = \frac{3}{2} U_{td} I_d = \frac{3}{2} I_d \sqrt{U_g^2 - I_d^2 X_g^2} - \frac{3}{2} I_q I_d X_g \tag{2}$$

类似于同步发电机中功角概念,决定新能源并网变换器输出有功功率的核心变量是交流侧有功电流 I_d ^[1]。新能源并网变换器的交流侧电感作为储能元件,其电流 I_d 、 I_q 不会发生突变。当新能源并网变换器输入、输出有功功率不平衡时,不平衡有功功率将导致直流电容电压改变,在直流电压外环作用下交流侧有功电流 I_d 发生改变,而 I_d 的改变又将进一步改变输出有功功率,从而使得输入、输出不平衡有功功率发生改变。本文中所定义的新能源

并网变换器的功率传输特性,是在等效为电流源的新能源并网变换器激励下并网 PCC 处的端口功率特性,该端口功率特性可以通过输出有功功率 P_{out} 与有功电流 I_d 之间的关系来表示。

依据式(2)和表 1 的参数,可以得到 S_{CR} 分别取值为 1.5、2.0、2.3、20(对应 X_g 分别取值为 9.67Ω、7.25Ω、6.31Ω、0.725Ω)时 P_{out} 与 I_d 的关系曲线($I_q=0$),如图 4 所示。

表 1 新能源并网变换器、SVC 和 SVG 的主要参数
Table 1 The main parameters for grid-connected converter, SVC and SVG

参数		数值
电网电压		3Φ 380V/50Hz
新能源并网变换器额定功率 P_N		10kW
新能源并网变换器滤波电感 L_s		2.6mH
新能源并网变换器额定有功电流幅值 I_{d_rated}		21.44A
SVC 容量	TCR	2kvar
	TSC	1.67kvar×3
SVG 容量		5kvar

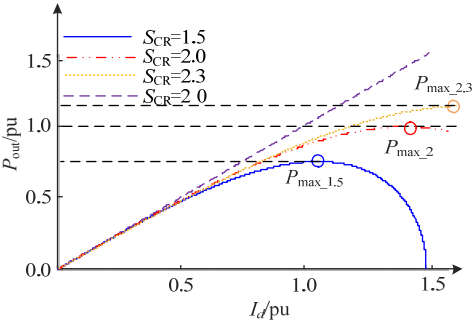


图 4 不同 S_{CR} 取值时新能源并网变换器的 P_{out} - I_d 曲线
Fig. 4 P_{out} - I_d curves of grid-connected converter under different SCR

由图 4 可见,当有功电流 I_d 较小时, P_{out} 随着 I_d 的增加而增加,而当 I_d 较大时, P_{out} 随着 I_d 的增加而减小。由式(2)可求出在 d 轴电流 I_d 达到 $U_g / (\sqrt{2} X_g)$ 时, P_{out} 达到极限输出功率 P_{out_max} ,如式(3)所示。由(3)可知,随着电网等效电抗 X_g 的增加,极限输出功率 P_{out_max} 逐渐减小。当 $S_{CR}=2$ 时, $P_{out_max}=1pu$,即此时极限输出功率等于额定功率;当 S_{CR} 小于 2 时(如 $S_{CR}=1.5$), P_{out_max} 小于额定功率($P_{out_max}=0.75pu$);当 S_{CR} 大于 2 时(如 $S_{CR}=2.3$), P_{out_max} 大于额定功率($P_{out_max}(pu)=1.15$)。

$$P_{out_max} = 3U_g^2 / 4X_g \tag{3}$$

由此可见,新能源并网变换器交流侧的极限输出功率会随着 S_{CR} 的减小而减小,极端情况下(当 $S_{CR}<2$ 时),新能源并网变换器将不再能输出额定功率。其关键原因在于:弱电网条件下当新能源并网

变换器输出有功增大时,并网 PCC 电压跌落也会增大, PCC 电压跌落反过来进一步限制了新能源并网变换器最大输出的有功功率。因此在实际工程中,为了保障新能源发电系统的有功功率输出能力,通常会在大规模光伏发电和风力发电的 PCC 处安装无功补偿装置,以维持 PCC 电压。

2 配置无功补偿后新能源并网变换器的功率传输特性

在大规模新能源发电系统 PCC 处安装的无功补偿装置会接收由上级调度中心发出的恒电压指令或者由自动电压控制系统(automatic voltage control, AVC)发出的恒无功指令^[17],这2种指令本质上都是以稳定 PCC 点电压为目的。因此,后续的分析中,假定无功补偿装置的跟踪指令为 PCC 电压指令值,分别针对 SVC 和 SVG 两种不同类型的无功补偿装置,研究其接入 PCC 后新能源并网变换器的功率传输特性。

2.1 PCC 接入 SVC

图 5 给出了在新能源并网变换器 PCC 接入 SVC 的典型电路结构图^[13]。假定 SVC 是由多组晶闸管投切电容器(thyristor switched capacitor, TSC)和一组晶闸管控制电抗器(thyristor controlled reactor, TCR)所构成,控制系统通过 PCC 电压控制环(PI_{SVC} 为控制器)将 U_i 稳定在 PCC 电压指令值 U_{i_SVCref} ($U_{i_SVCref}=U_g$),并由此生成 SVC 的基波电纳指令值 B_{SVCref} , SVC 通过控制 TSC 的投切组数以及 TCR 的触发延时角 α 来实现对 B_{SVCref} 的跟踪。

SVC 的基波电纳记为 B_{SVC} ,且定义 $B_{SVC}>0$ 时 SVC 进行容性补偿、 $B_{SVC}<0$ 时 SVC 进行感性补偿,则 B_{SVC} 可以用式(4)表示,当所有 TSC 全部投入、TCR 触发延时角为 $\pi/2$ 时, B_{SVC} 达到最大值 B_{TSC} ;当所有 TSC 都不投入、TCR 触发延时角为 0 时,

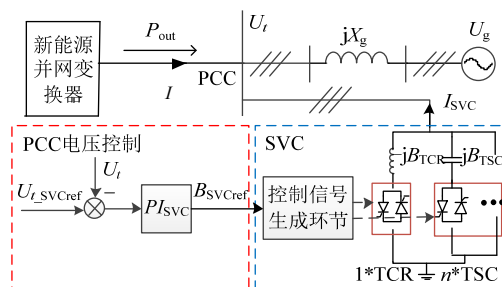


图 5 接入 SVC 后的系统典型电路结构与控制框图

Fig. 5 Typical circuit structure and control block diagram of system while adopting SVC

B_{SVC} 达到最小值 $-B_{TCR}$ 。将 SVC 等效为基波电纳 B_{SVC} 、新能源并网变换器等效为一个受控电流源,可得到包含新能源并网变换器、SVC 的基频等效电路,如图 6 所示。

$$B_{SVC} = B_{TSC} - B_{TCR} \quad (4)$$

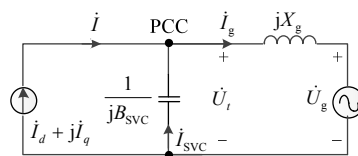


图 6 接入 SVC 补偿后新能源并网变换器并入弱电网的交流侧等效电路

Fig. 6 Equivalent AC-side circuit of grid-connected converter connected with the weak grid while adopting SVC

当新能源并网变换器输出的有功电流 I_d 较小时,随着 I_d 的增大, PCC 电压 U_i 会减小。此时 SVC 通过增大等效电纳 B_{SVC} 来增大 U_i ,并在其容量补偿范围内将 U_i 补偿到指令值 U_g ,这个阶段中 U_i 和新能源并网变换器输出有功功率 P_{out_SVC} 可以分别用式(5)、(6)表示。

$$U_i = \sqrt{U_g^2 - I_d^2 X_g^2} - (I_q - B_{SVC} U_i) X_g = U_g \quad (5)$$

$$P_{out_SVC} = \frac{3}{2} U_g I_d \quad (6)$$

当新能源并网变换器的输出有功电流 I_d 进一步增大并达到某临界值 I_{d_SVC} 后, SVC 的等效电纳 B_{SVC} 达到了最大值 B_{TSC} (SVC 投入了全部 TSC 且 TCR 的触发延时角为 $\pi/2$),此后如果 I_d 进一步增大导致 PCC 电压 U_i 进一步减小, SVC 的等效电纳 B_{SVC} 保持为最大值 B_{TSC} , PCC 电压 U_i 将小于指令值 U_g 。由图 6 可求得新能源并网变换器输出有功电流的临界值 I_{d_SVC} 以及 PCC 电压 U_i 的表达式,分别如式(7)、(8)所示。

$$I_{d_SVC} = \sqrt{\frac{2U_g}{X_g} (U_g B_{TSC} - I_q) - (U_g B_{TSC} - I_q)^2} \quad (7)$$

$$U_i = \frac{1}{1 - B_{TSC} X_g} (\sqrt{U_g^2 - I_d^2 X_g^2} - I_q X_g) \quad (8)$$

新能源并网变换器输出有功功率 P_{out_SVC} 可以表示为

$$P_{out_SVC} = \frac{3}{2(1 - B_{TSC} X_g)} (\sqrt{U_g^2 - I_d^2 X_g^2} - I_q X_g) I_d \quad (9)$$

综合式(6)、(9),可以得到在 $I_q=0$ 时, SVC 补偿后新能源并网变换器有功功率 P_{out_SVC} 的表达式

如(10)所示。

$$P_{\text{out_SVC}} = \begin{cases} \frac{3}{2} U_g I_d, & I_d \leq I_{d_SVC} \\ \frac{3}{2} \frac{1}{1 - B_{TSC} X_g} I_d \sqrt{U_g^2 - I_d^2 X_g^2}, & I_d > I_{d_SVC} \end{cases} \quad (10)$$

基于表1所给出的参数以及式(5)、(8)、(10), 图7给出了 $I_q=0$ 时, PCC接入SVC后不同 S_{CR} 参数下新能源并网变换器的 $P_{\text{out_SVC}}-I_d$ 、 U_f-I_d 、 $B_{SVC}-I_d$ 曲线。

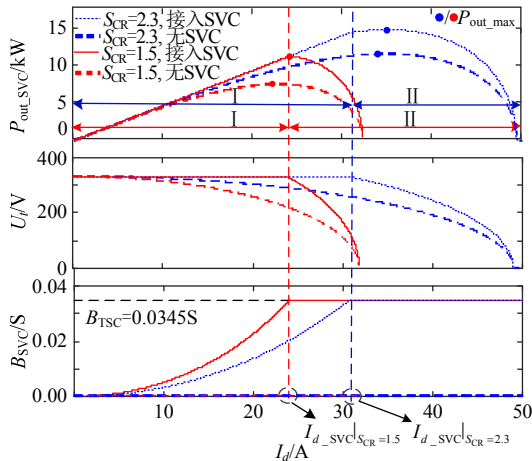


图7 接入SVC补偿后不同 S_{CR} 参数下新能源并网变换器的 $P_{\text{out_SVC}}-I_d$ 、 U_f-I_d 、 $B_{SVC}-I_d$ 曲线

Fig. 7 The $P_{\text{out_SVC}}-I_d$, U_f-I_d and $B_{SVC}-I_d$ curves of grid-connected converter with different SCR parameters while adopting SVC

由图7可知, SVC补偿后新能源并网变换器的 $P_{\text{out_SVC}}-I_d$ 曲线将分为两段: 当有功电流 I_d 小于 I_{d_SVC} 时, SVC能够在其容量补偿范围内将PCC电压 U_f 补偿到指令值 U_g , $P_{\text{out_SVC}}$ 随 I_d 的增大而线性增大; 当有功电流 I_d 大于 I_{d_SVC} 时, SVC达到了其容量上限, SVC等值为恒定电纳 B_{TSC} , $P_{\text{out_SVC}}-I_d$ 曲线呈抛物线型。此外, 由图7的 $P_{\text{out_SVC}}-I_d$ 曲线可知 S_{CR} 取值会影响到新能源并网变换器的极限输出功率: 当 S_{CR} 较小时($S_{CR}=1.5$), 极限输出功率在 $I_d=I_{d_SVC}$ 时取得, 为 $P_{\text{out_max}}=11.18\text{kW}$; 当 S_{CR} 较大时($S_{CR}=2.3$), 极限输出功率在 $I_d>I_{d_SVC}$ 时取得, $P_{\text{out_max}}=14.74\text{kW}$ 。同时, 相较于无SVC补偿, 有SVC补偿后PCC电压稳定范围以及新能源并网变换器的极限输出功率均有较大幅度提升。

2.2 PCC接入SVG

在新能源并网变换器PCC处接入SVG后的等效电路和控制框图如图8所示。SVG的控制部分在其自身的 dq 旋转坐标系下实现, SVG通过PLL向

将 d 轴定向在PCC电压 $\dot{U}_f$ 上(q 轴超前 d 轴 90°), 其无功补偿策略如下: 基于下垂特性电压调节策略^[18]生成PCC电压指令 U_{f_SVGref} , PCC电压控制环(PI_{U_f} 为控制器)实现 U_f 对 U_{f_SVGref} 的跟踪并产生交流侧无功电流指令 I_{SVG_Qref} , 再基于无功电流控制环(PI_{I_Q} 为控制器)实现交流侧无功电流 I_{SVG_Q} 对 I_{SVG_Qref} 的跟踪; 同时, 为了补偿SVG自身的有功损耗, 直流侧电容电压控制环($PI_{U_{dc}}$ 为控制器)实现直流侧电容电压 U_{dc_SVG} 对直流侧电压指令 U_{dc_SVGref} 的跟踪, 再基于有功电流控制环(PI_{I_P} 为控制器)实现交流侧有功电流 I_{SVG_P} 对电流指令 I_{SVG_Pref} 的跟踪。

SVG的下垂特性电压调节策略可以用式(11)表征, 式中 U_{f_SVGref} 为PCC电压指令, U_g 为额定电压, K 为下垂系数且 $K>0$ 。考虑到SVG自身损耗较小, 交流侧有功电流 I_{SVG_P} 可以忽略不计, 因此 I_{SVG_Q} 近似等于交流侧电流 I_{SVG} 。结合图8所定义的 I_{SVG} 参考方向, 定义 $I_{SVG}>0$ 时SVG输出感性无功电流、 $I_{SVG}<0$ 时SVG输出容性无功电流。

$$U_{f_SVGref} = U_g - K \cdot I_{SVG_Q} \approx U_g - K \cdot I_{SVG} \quad (11)$$

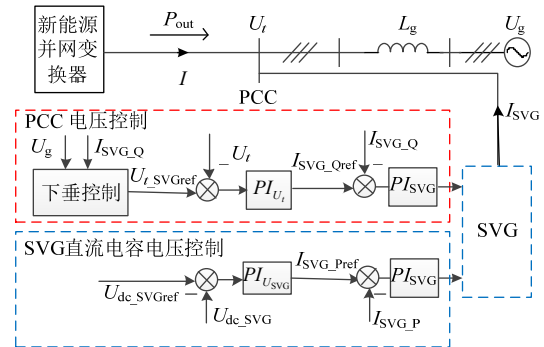


图8 接入SVG后的系统典型电路结构与控制框图

Fig. 8 Typical circuit structure and control block diagram of system while adopting SVG

忽略SVG电流环动态, 将SVG交流侧等效为受控电流源 I_{SVG} 、新能源并网变换器等效为受控电流源, 可得到包含新能源并网变换器、SVG的基频等效电路, 如图9所示。

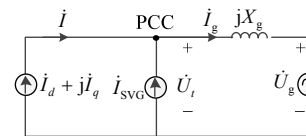


图9 接入SVG补偿后新能源并网变换器并入弱电网的交流侧等效电路

Fig. 9 Equivalent AC circuit of grid-connected converter connected with the weak grid while adopting SVG

当新能源并网变换器的有功电流 I_d 较小时, PCC 电压 U_t 跌落较小, SVG 可以通过调控其输出电流 I_{SVG} 将 U_t 补偿到 $U_{t_SVG\text{ref}}$; 当 I_d 大于某临界值 I_{d_SVG} 时, 即使 SVG 输出最大补偿电流依然无法将 U_t 补偿到 $U_{t_SVG\text{ref}}$, 此时 SVG 输出额定电流 $I_{\text{SVG_rated}}$ 并保持不变。由图 9 可得到在 $I_q=0$ 时, I_d 小于和大于 I_{d_SVG} 的 U_t 表达式:

$$U_t = \begin{cases} \sqrt{U_g^2 - I_d^2 X_g^2} + I_{\text{SVG}} X_g = U_{t_SVG\text{ref}}, & I_d \leq I_{d_SVG} \\ \sqrt{U_g^2 - I_d^2 X_g^2} + I_{\text{SVG_rated}} X_g, & I_d > I_{d_SVG} \end{cases} \quad (12)$$

将式(11)所表示的 $U_{t_SVG\text{ref}}$ 代入式(12)中, 可求得在 $I_d \leq I_{d_SVG}$ 时 I_{SVG} 如式(13)所示。再将式(13)代入式(12), 即可将 U_t 表征为与新能源并网变换器输出有功电流 I_d 相关的表达式, 如式(14)。

$$I_{\text{SVG}} = \frac{U_g - \sqrt{U_g^2 - I_d^2 X_g^2}}{K + X_g} \quad (13)$$

$$U_t = \begin{cases} \sqrt{U_g^2 - I_d^2 X_g^2} + \frac{U_g - \sqrt{U_g^2 - I_d^2 X_g^2}}{K + X_g} X_g & (I_d \leq I_{d_SVG}) \\ \sqrt{U_g^2 - I_d^2 X_g^2} + I_{\text{SVG_rated}} X_g & (I_d > I_{d_SVG}) \end{cases} \quad (14)$$

由式(14), 即可求得 $I_q=0$ 时, 新能源并网变换器输出的有功功率 $P_{\text{out_SVG}}$:

$$P_{\text{out_SVG}} = \begin{cases} \frac{3}{2} (\sqrt{U_g^2 - I_d^2 X_g^2} + \frac{U_g - \sqrt{U_g^2 - I_d^2 X_g^2}}{K + X_g} X_g) I_d & (I_d \leq I_{d_SVG}) \\ \frac{3}{2} (\sqrt{U_g^2 - I_d^2 X_g^2} + I_{\text{SVG_rated}} X_g) I_d & (I_d > I_{d_SVG}) \end{cases} \quad (15)$$

下垂系数 K 可以由下式求解:

$$K = \frac{\Delta U_{T\text{max}}}{I_{\text{SVG_rated}}} \quad (16)$$

$I_{\text{SVG_rated}}$ 为 SVG 的额定电流, 可由式(17)计算得到(SVG 的参数见表 1); $\Delta U_{T\text{max}}$ 表示在 SVG 输出额定感性补偿电流时 PCC 电压与额定电压之间的差值, 因风电场允许的电压波动范围^[19]一般为 $-3\% \sim 7\%$, 所以可取 $\Delta U_{T\text{max}} = 0.03 U_g$ 。

$$I_{\text{SVG_rated}} = \sqrt{2} \cdot \frac{5\text{kVar}}{220 \cdot 3} = 10.712\text{A} \quad (17)$$

结合表 1 所给出的参数, 可以得到 $I_q=0$ 时, 不同 S_{CR} 参数下的 $P_{\text{out_SVG}}-I_d$ 、 U_t-I_d 、 $I_{\text{SVG}}-I_d$ 的曲线, 如图 10 所示。

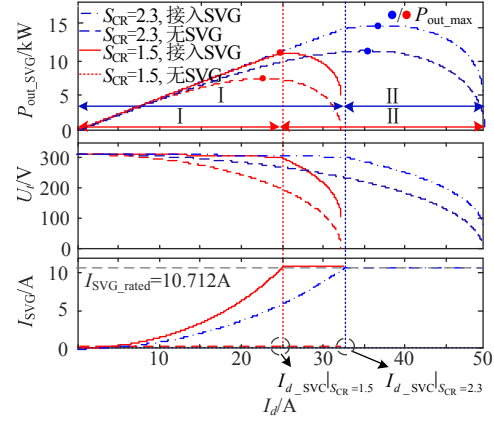


图 10 接入 SVG 补偿后不同 S_{CR} 参数下
新能源并网变换器的 $P_{\text{out_SVG}}-I_d$ 、 U_t-I_d 、 $I_{\text{SVG}}-I_d$ 曲线

Fig. 10 $P_{\text{out_SVG}}-I_d$, U_t-I_d and $I_{\text{SVG}}-I_d$ curves of
grid-connected converter with different
 S_{CR} parameters while adopting SVG

其中, SVG 补偿后新能源并网变换器的极限输出功率有较大提升。同时, 其输出有功功率曲线 $P_{\text{out_SVG}}-I_d$ 包含两段, 一段对应于 $I_d \leq I_{d_SVG}$, 另一段对应于 $I_d > I_{d_SVG}$, 两段曲线的分界点处恰好对应于 SVG 达到了其额定补偿容量。此外, 在不同 S_{CR} 参数下 $P_{\text{out_SVG}}-I_d$ 曲线呈现不同特征: 当 S_{CR} 较小时 ($S_{\text{CR}}=1.5$), 极限输出功率在 $I_d=I_{d_SVG}$ 时取得, 且 $P_{\text{out_max}}=11.22\text{kW}$; 当 S_{CR} 较大时 ($S_{\text{CR}}=2.3$), 极限输出功率在 $I_d > I_{d_SVG}$ 时取得, 且 $P_{\text{out_max}}=15.16\text{kW}$ 。

2.3 小结

由 2.1 与 2.2 节分析可知, 在 PCC 接入 SVC、SVG 并结合实际情况考虑无功补偿装置容量后, 新能源并网变换器的功率传输特性将会出现分段特性, 并且其极限传输功率与 S_{CR} 、无功补偿装置容量和类型等因素有关。

如果无功补偿装置的容量不受限, 那么 PCC 电压可以被无功补偿装置补偿到其电压指令值(对 SVC 而言, PCC 电压指令值即为额定电压 U_g ; 对于 SVG 而言, PCC 电压指令值由下垂特性调节策略得到, 为 $U_{t_SVG\text{ref}}$), 此时, PCC 可以等效为幅值恒定的电压源, 新能源并网变换器的极限输出功率出现在 PCC 电压与无穷大电网电压之间相角差为 90° 时, 类似于同步发电机并联无穷大电网时的特性。

当 S_{CR} 较小时, 随着新能源并网变换器输出有功电流 I_d 的增大, PCC 电压跌落较快, 有限容量的无功补偿装置对 PCC 电压的稳定控制范围较窄; 当 S_{CR} 较大时, 随着新能源并网变换器输出有功电流的增大, PCC 电压跌落较慢, 有限容量无功补偿装置对 PCC 电压的稳定控制范围较宽。

采用 SVC/ SVG 无功补偿装置后, 在无功补偿的容量范围内, PCC 电压 U_i 可以被补偿到指令值, 并网变换器输出有功功率与其输出有功电流成正比; 当 SVC/ SVG 输出最大补偿容量时, PCC 电压 U_i 会随着新能源并网变换器输出有功电流的增大而减小, 此时新能源并网变换器的输出有功功率不再与输出有功电流成正比关系, 其输出功率特性由新能源并网变换器的输出电流与 PCC 电压相互作用而决定。对于 SVC 而言, 在达到额定补偿容量后呈现恒定电纳特性, SVC 提供的无功功率与 PCC 电压的平方成比例; 对于 SVG 而言, 在达到额定补偿容量后呈现恒定无功电流源特性, SVG 提供的无功功率与 PCC 电压成比例。因此, 在新能源并网变换器输出有功电流增大导致 PCC 电压进一步减小时, SVG 提供的无功功率大于 SVC, 因此从无功补偿效果上看, 同等容量的 SVG 优于 SVC, 但 SVG 价格远远高于 SVC。

3 仿真结果

为验证上述理论分析的正确性, 在 MATLAB/ Simulink 中搭建了仿真模型如图 11 所示。仿真中的无功补偿装置容量按照国家电网企业标准^[20]进行选配: SVC、SVG 的容量设定为新能源并网变换器容量的 50%。表 1 给出了新能源并网变换器、SVC 和 SVG 的主要参数。

图 11 中, 将电网等效为理想电压源和线路电抗, 新能源并网变换器等效为三相受控电压源, 其

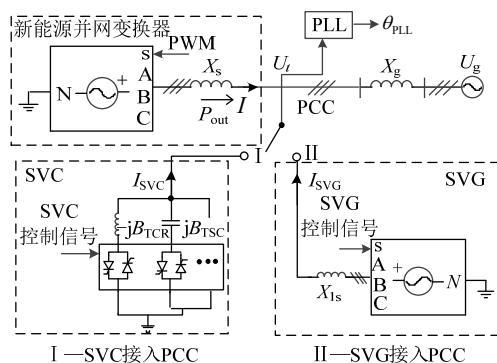


图 11 仿真示意图

Fig. 11 Schematic diagram of simulation

控制部分如图 1 所示(将 I_{qref} 设置为 0), 忽略新能源并网变换器的开关过程以避免开关纹波的影响。在场景 I 中, SVC 接入 PCC 提供无功补偿, SVC 的控制信号由图 5 所示的控制环节生成; 在场景 II 中, SVG 接入 PCC 提供无功补偿, SVG 同样等效为三相受控电压源, 其控制部分由图 8 所示。在不同 S_{CR} 参数($S_{CR}=1.5$ 和 $S_{CR}=2.3$)条件下, 对场景 I 和 II 分别进行仿真分析, 如 3.1 与 3.2 节所示。

3.1 PCC 接入 SVC 的仿真分析(场景 I)

仿真中的 SVC 是由容量为 5kvar 的 TSC(由 3 台容量为 1.67kvar 的 TSC 构成)和容量为 2kvar 的 TCR 构成。图 12、13 分别给出了 $S_{CR}=1.5$ 和 $S_{CR}=2.3$ 两种参数下 P_{out_SVC} 、 U_i 、 B_{SVC} 、TSC 投切信号(1 为投入, 0 为切出)以及 TCR 触发延时角 的仿真波形。

当 $S_{CR}=1.5$ 时, 由图 7 中理论分析结果可知 SVC 补偿后新能源并网变换器的极限输出功率为 11.18kW。图 12 仿真波形可以看出, 当输入功率 P_{in} 小于 11.1kW 时, 输出功率 P_{out_SVC} 与 P_{in} 保持一致, 系统稳定; 当 P_{in} 大于 11.1kW 后, P_{out_SVC} 取值不能与 P_{in} 保持一致, 而且随着 P_{in} 的进一步增大 P_{out_SVC} 会逐渐减小, P_{in} 与 P_{out_SVC} 之间的功率差值将驱动新能源并网变换器内部储能元件的状态发生偏离, 并导致系统失稳, 此时 SVC 达到额定补偿容量且 $B_{SVC}=0.0345$ s。由仿真结果可见, 新能源

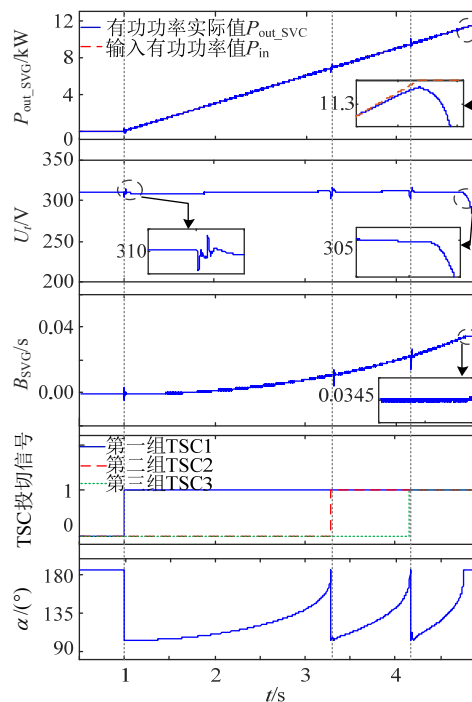
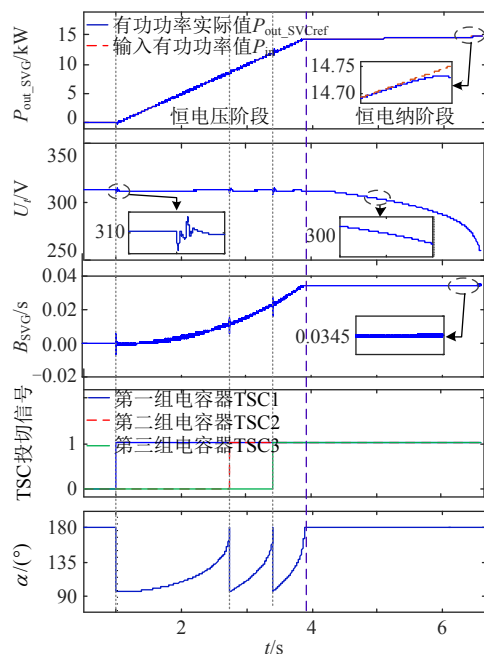


图 12 SVC 补偿时的仿真结果($S_{CR}=1.5$)

Fig. 12 Simulation results with SVC compensation($S_{CR}=1.5$)

图13 SVC补偿时的仿真结果($S_{CR}=2.3$)Fig. 13 Simulation results with SVC compensation($S_{CR}=2.3$)

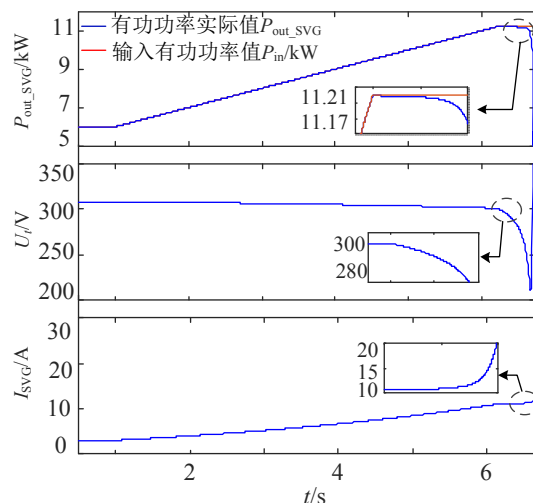
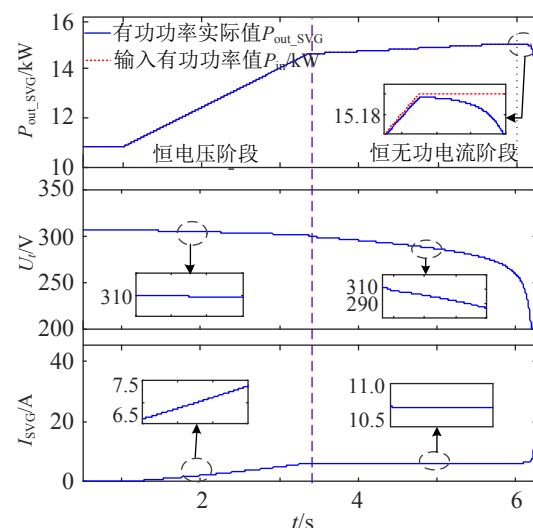
并网变换器的极限输出功率为 11.1kW, 与理论分析结果一致。

当 $S_{CR}=2.3$ 时, 由图 7 的理论分析结果可得到 SVC 补偿后新能源并网变换器的极限输出功率为 14.7kW。图 13 的仿真波形可知, 在新能源并网变换器的输入功率 P_{in} 增加到 14.3kW 时, SVC 达到最大补偿容量($B_{SVC}=0.0345s$)并开始进入恒定电纳补偿阶段; 当 P_{in} 继续从 14.3kW 增加至 14.7kW 时, 输出功率 P_{out_SVC} 仍然可以与 P_{in} 保持一致, 新能源并网变换器稳定; 当输入功率 P_{in} 大于 14.7kW 时, P_{out_SVC} 随着 P_{in} 的增大反而减小。由仿真结果可见, 新能源并网变换器极限输出功率约为 14.7kW, 与理论分析一致。

3.2 PCC 接入 SVG 的仿真分析(场景 II)

仿真中 SVG 的容量为 5kvar, 其控制框图如图 8 所示。图 14、15 分别给出了 $S_{CR}=1.5$ 和 $S_{CR}=2.3$ 两种参数下 P_{out_SVG} 、 U_i 、 I_{SVG} 的仿真波形。

当 $S_{CR}=1.5$ 时, 由图 10 的理论分析结果可知 SVG 补偿后新能源并网变换器的极限传输功率为 11.22kW。由图 14 的仿真波形可知, 当输入功率 P_{in} 小于 11.2kW 时, 输出功率 P_{out_SVG} 与 P_{in} 保持一致, I_{SVG} 随 P_{in} 的增大而增大, PCC 电压 U_i 随 P_{in} 的增大而略微减小(体现了 SVG 对 PCC 电压的下垂控制策略); 当输入功率 P_{in} 大于 11.2kW 时, P_{out_SVG} 随着 P_{in} 的增大反而减小, 系统失稳。仿真得到的

图14 SVG补偿时的仿真结果($S_{CR}=1.5$)Fig. 14 Simulation results with SVG compensation($S_{CR}=1.5$)图15 SVG补偿时的仿真结果($S_{CR}=2.3$)Fig. 15 Simulation results with SVG compensation($S_{CR}=2.3$)

新能源并网变换器极限输出功率约为 11.2kW, 与理论分析一致。

当 $S_{CR}=2.3$ 时, 由图 10 的理论分析结果可知, SVG 补偿后新能源并网变换器的极限传输功率为 15.2kW。图 15 的仿真波形可以看出, 在新能源并网变换器的输入功率 P_{in} 增加到 14.7kW 时, SVG 达到最大补偿电流($I_{SVG}=10.712A$)并开始进入恒无功电流补偿阶段; 当 P_{in} 继续从 14.7kW 增加至 15.18kW 时, 输出功率 P_{out_SVG} 仍然可以与 P_{in} 保持一致, 新能源并网变换器稳定; 当输入功率 P_{in} 大于 15.18kW 时, P_{out_SVG} 随着 P_{in} 的增大反而减小, 系统失稳。仿真得到的新能源并网变换器极限输出功率约为 15.18kW, 与理论分析结果一致。

4 结论

本文开展了加入 SVC、SVG 补偿后新能源并网变换器有功功率传输特性的研究, 得到以下结论:

1) 加入无功补偿(SVC/SVG)后, 新能源并网变换器的极限输出功率得到了提升, 且极限输出功率与无功补偿类型、SCR、无功补偿装置容量有关。

2) 在 S_{CR} 较小时, 新能源并网变换器的极限输出功率是在无功补偿装置恰好达到额定容量时取得; 在 S_{CR} 较大时, 极限输出功率是在无功补偿装置超过额定容量时取得(此时 SVC 等值为恒定容抗、SVG 等值为恒定无功电流源)。

3) 当新能源并网变换器的输出有功电流增大并导致 PCC 电压减小时, 同等容量的 SVG 所能补偿的无功大于 SVC, SVG 的无功补偿效果优于 SVC。

参考文献

- [1] 康勇, 林新春, 郑云, 等. 新能源并网变换器单机无穷大系统的静态稳定极限及静态稳定工作区[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(14): 4506-4515.
KANG Yong, LIN Xinchun, ZHENG Yun, et al. The static stable-limit and static stable-working zone for single-machine infinite-bus system of renewable-energy grid-connected converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4506-4515(in Chinese).
- [2] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14.
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14(in Chinese).
- [3] 陈国平, 董昱, 梁志峰. 能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5493-5506.
CHEN Guoping, DONG Yu, LIANG Zhifeng. Analysis and reflection on high-quality development of new energy with chinese characteristics in energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5493-5506 (in Chinese).
- [4] 黄云辉, 周翩, 王龙飞. 弱电网下基于矢量控制的并网变换器功率控制稳定性[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 93-99.
HUANG Yunhui, ZHOU Pian, WANG Longfei. Power control stability in vector control based voltage source converters connected to weak grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 93-99(in Chinese).
- [5] 陆韶琦, 徐政. 采用功率同步控制的 MMC-HVDC 功率极限分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1868-1876.
LU Shaoqi, XU Zheng. Analysis of the maximum power flow in power synchronization control based MMC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1868-1876(in Chinese).
- [6] ZHOU J Z. DING Hui, FAN Shengtao, et al. Impact of short-circuit ratio and phase-locked-loop parameters on the small-signal behavior of a VSC-HVDC converter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2287-2296.
- [7] 杨健, 洪潮, 周保荣, 等. 受端弱系统条件下 STATCOM 提升直流输电能力机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(17): 5005-5014.
YANG Jian, HONG Chao, ZHOU Baorong, et al. Study on mechanism of STATCOM improving the transmission capability of HVDC connected to weak AC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(17): 5005-5014(in Chinese).
- [8] 郭春义, 李丹, 彭茂兰, 等. 静止同步补偿器对高压直流输电系统运行极限的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2391-2399.
GUO Chunyi, LI Dan, PENG Maolan, et al. Influences of STATCOM on critical operating limits of HVDC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2391-2399(in Chinese).
- [9] 丁立国, 沈阳武, 许加柱, 等. 连接弱交流系统的高压直流换流站无功补偿协调控制策略[J]. 电网系统自动化, 2017, 41(8): 22-29.
DING Liguang, SHEN Yangwu, XU Jiazhu, et al. Coordinated control strategy of reactive compensation for HVDC converter station connected to weak AC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 22-29(in Chinese).
- [10] 周长春, 徐政. 联于弱交流系统的 HVDC 故障恢复特性仿真分析[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 18-21.
ZHOU Changchun, XU Zheng. Simulation and analysis of recovery characteristics of HVDC connected to AC system with weak strength[J]. Power System Technology, 2003, 27(11): 18-21(in Chinese).
- [11] 刘昇, 徐政. 联于弱交流系统的 VSC-HVDC 稳定运行区域研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 133-144.
LIU Sheng, XU Zheng. Study on stable operating region of VSC-HVDC connected to weak AC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 133-144(in Chinese).
- [12] 王银顺, 李潇潇, 张鑫. 基于临界短路比的 VSC-HVDC 接入弱交流系统的运行特性[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1106-1113.

- WANG Yinshun, LI Xiaoxiao, ZHANG Xin. Operation characteristics of VSC-HVDC links connected to weak AC systems based on critical SCR[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1106-1113(in Chinese).
- [13] 戴先中, 张凯锋. 含控制器在内电力系统元件的完整结构化模型及其简化(II): SVC、TCSC 与 HVDC 建模应用[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(15): 4363-4371.
- DAI Xianzhong, ZHANG Kaifeng. The Integral and Simplified Structural Model of Power System's Component Including Component's Controller (Part II): Model Construction of SVC, TCSC and HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(15): 4363-4371 (in Chinese).
- [14] 张前进, 周林, 李海啸, 等. 考虑 SVG 补偿装置的大型光伏并网系统振荡分析与抑制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2636-2644.
- ZHANG Qianjin, ZHOU Lin, LI Haixiao, et al. Oscillation analysis and suppression of large-scale grid-connected photovoltaic system considering SVG equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2636-2644 (in Chinese).
- [15] 郭强, 孙华东, 高磊, 等. 计及风电场随机特性的 SVG 模型参数智能辨识方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(24): 7950-7958.
- GUO Qiang, SUN Huadong, GAO Lei, et al. Intelligent identification of static var generator model with stochastic characters of wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24): 7950-7958 (in Chinese).
- [16] 袁豪, 袁小明. 用于系统直流电压控制尺度暂态过程研究的电压源型并网变换器幅相运动方程建模与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6882-6892.
- YUAN Hao, YUAN Xiaoming. Modeling and characteristic analysis of grid-connected vscs based on amplitude-phase motion equation method for power system transient process study in DC-link voltage control timescale[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6882-6892 (in Chinese).
- [17] 宋成铭. 基于多智能体系统的 AGC、AVC 协调控制[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- SONG Chengming. Coordination control of AGC and AVC based on multi-agent system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019(in Chinese).
- [18] 陈坚. 柔性电力系统中的电力电子技术——电力电子技术在电力系统中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- CHEN Jian. Power electronics technology inflexible power system[M]. Beijing: China Machine Press, 2012(in Chinese).
- [19] 国家能源局. NB/T 31003—2011 大型风电场并网设计技术规范[S]. 北京: 原子能出版社, 2011.
- National Energy Administration. NB/T31003—2011 Design regulations for large-scale wind power connecting to the system[S]. Beijing: China Atomic Energy Press, 2011(in Chinese).
- [20] 国家电网公司. Q/GDW 212—2008 电力系统无功补偿配置技术原则[S]. 2008.
- State Grid Corporation of China. Q/GDW 212—2008 Technical regulation for configuration reactive power compensation equipment of power system[S]. 2008(in Chinese).



康勇

在线出版日期: 2020-08-10。

收稿日期: 2020-04-09。

作者简介:

康勇(1965), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子电路控制、交流测电机驱动、电磁兼容性和可再生能源发电系统, ykang@mail.hust.edu.cn;

*通信作者: 林新春(1974), 男, 副教授, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用以及相关的控制技术、电力电子化电力系统稳定性理论与分析, linxinchun2002@sina.com;

潘辰(1996), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力电子及电力传动, m201871427@hust.edu.cn;

刘文斌(1995), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子及电力传动, liuwenbin@hust.edu.cn。

(责任编辑 邱丽萍)

Analysis of Power Transmission Characteristics of Renewable Energy Grid-connected Converter Considering SVC and SVG Compensation Under Weak Grid Condition

KANG Yong, LIN Xinchun*, PAN Chen, LIU Wenbin

(Huazhong University of Science and Technology)

KEY WORDS: renewable energy grid-connected converter; static var compensator; static var generator, power transmission characteristic

In China, renewable energy resources are mainly concentrated in remote areas with weak grid characteristics. Grid-connected converter (GCC) is the energy conversion device between renewable energy and power grid. When it outputs active power to the grid, the reactive power consumed by the equivalent reactance of the weak grid will lead to the voltage drop of the common coupling point (PCC), which will limit the output active power of the GCC. Therefore, static var compensators (SVC) and static var generators (SVG) are often connected to PCC to provide reactive power compensation.

While ignoring the dynamics of PLL and current loop, the AC-side fundamental frequency equivalent circuit of GCC connecting with power grid is obtained, and then the power transmission characteristic curve of GCC can be achieved. When SVC and SVG with the capacity limit are connected to PCC, the output active power of GCC can be expressed as shown in (1) and (2), and GCC's power transmission characteristic curves are drawn in Fig.1.

$$P_{out_SVC} = \begin{cases} \frac{3}{2} U_g I_d, & I_d \leq I_{d_SVC} \\ \frac{3}{2} \frac{1}{1-B_{TSC} X_g} I_d \sqrt{U_g^2 - I_d^2 X_g^2}, & I_d > I_{d_SVC} \end{cases} \quad (1)$$

$$P_{out_SVG} = \begin{cases} \frac{3}{2} \left(\sqrt{U_g^2 - I_d^2 X_g^2} + \frac{U_g - \sqrt{U_g^2 - I_d^2 X_g^2}}{K + X_g} X_g \right) I_d, & I_d \leq I_{d_SVG} \\ \frac{3}{2} \left(\sqrt{U_g^2 - I_d^2 X_g^2} + I_{SVG_rated} X_g \right) I_d, & I_d > I_{d_SVG} \end{cases} \quad (2)$$

It can be seen that the SCR, the capacity and type of reactive power compensation devices will have influence on the power transmission characteristic of GCC, which exhibits segmented characteristics when

adopting SVC/ SVG for compensation. If SVC/ SVG can compensated the PCC voltage to the reference value which means the output reactive power is within its capacity, the output active power of GCC is linear with its output active current. However, while PCC voltage can't be compensated to the reference value by SVC/ SVG, implying that both SVC and SVG have reached their capacity limits and can be equivalent to constant capacitance for SVC and constant reactive current source for SVG. At this time, the output active power of GCC presents a parabolic characteristic with its output active current, and under the same capacity, the reactive compensation effect of SVG is better than that of SVC.

Moreover, when SCR is small, GCC will reach its maximum output power when SVC and SVG just reach their capacity limit. While for large SCR, GCC will reach its maximum output power, when SVC and SVG exceed their capacity limit, as the points marked in Fig. 1.

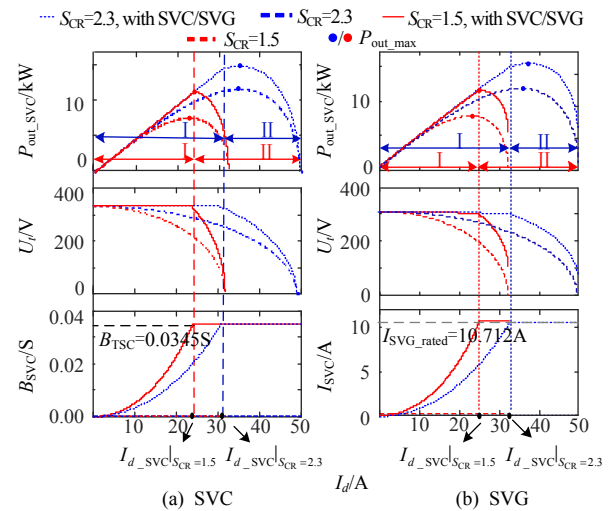


Fig. 1 Power transmission characteristic curves of GCC while adopting SVC and SVG

Finally, the correctness of the above theoretical analysis is verified by MATLAB/Simulink simulations.