

SVG 协同风电场的电网电压稳定控制策略研究

杨 蕾¹, 周宗仁², 郭 成¹, 周 鑫¹, 何 鑫¹, 黄 伟³, 和 鹏¹, 王德林²

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217;
2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 611756;
3. 云南电力调度中心, 云南 昆明 650011)

摘要: 针对含风电场及 SVG 的电网因外部因素引起的电压偏差和波动问题,提出一种利用 SVG 和 DFIG 风电场协同控制电压的综合策略。根据监测点的电压波动,在电压骤升骤降时,通过 PI 控制和逻辑选择对 SVG 及 DFIG 进行控制,给出了整个调节系统的框架和流程。充分利用 SVG 调节无功的快速性,优先使用 SVG 输出无功功率对监测点电压进行支撑;如果超出了 SVG 的调节能力,在保证风电机组满足规定的功率因数前提下再调节风电机组进行无功输出,最终实现稳定监测点电压的目标。在检测到电压稳定后,还需要对无功分配情况进行合理性判别,对存在的不利情况进行无功重分配,避免不必要的无功流动,提高风电接入后电网的运行稳定性。

关键词: 风电场; SVG; 协同控制; 电压支撑; 无功重分配

DOI: 10.12067/ATEEE2005006 **文章编号:** 1003-3076(2020)10-0055-10 **中图分类号:** TM761+.1

1 引言

现今社会倡导可持续发展,因此风能等清洁能源被广泛开发和利用^[1-4],但风电占比的增高也为电网的稳定运行带来了一系列影响。因为风能资源的不确定性会导致风电场的功率输出不稳定,所以风电场大规模并网后会在很大程度上影响电网的电压质量^[5-7]。此外,当系统中有故障或者有大容量负荷投切时,电网系统的电压也不可避免地产生波动。而无功功率与电压息息相关,保持无功功率的平衡是解决电网电压稳定问题的关键^[8]。因此在含静止无功发生器(Static Var Generator,SVG)及风电场的电网中,研究风电场与 SVG 协同控制无功的策略对改善电网电压的稳定问题具有重要意义。

文献[5-11]分析了双馈异步发电机(Doubly-Fed Induction Generator,DFIG)发出无功功率的范围,阐述了 DFIG 风电场控制电压及无功的方法和策略,但未考虑加入无功补偿设备及它们之间的协调控制问题。文献[12-14]将 SVG 运用在风电场中实现对电压的支撑,但没有考虑利用 DFIG 机组进

行无功调节,也未研究它们之间的协调配合问题。

文献[15-18]分析了双馈风电机和 SVG 协调配合进行无功补偿的策略。通过测量并网点电压偏差,据此整定计算出系统的无功功率缺额,再与风电机组自身发出无功功率的极限值进行比较,首先让风电机组充分地发出无功,多余部分由 SVG 补足。该思路充分利用了风电场的无功调节能力,在一定程度上降低了无功补偿装置的容量,具有一定的经济性。但在很多情况下 SVG 很可能并未充分利用,在 SVG 容量已经确定并且配备的情况下也是一种资源浪费,而且没有充分发挥 SVG 的优越性能。此外,风电场在支撑电压的时候尽可能多的产生无功也在一定程度上影响了有功出力以及功率因数。

文献[19]提出了利用双馈感应风电机组与电容器组进行协调控制风电场接入点电压的方法和策略。该方案把风功率的预测数据作为判断和决策的基础,首先对电容器组采用预投切控制,实现无功的粗调;然后再由风电机组来补充风电场的实测无功功率差额,实现无功的细调。但该方式依赖对次日风况的预测准确度,具有一定程度的不准确性,而且

收稿日期: 2020-05-08
基金项目: 国家自然科学基金项目(51777176)、云南电网有限责任公司科技项目(056200KK52180067)
作者简介: 杨 蕾(1986-),女,湖南籍,工程师,硕士,研究方向为电力系统稳定分析与控制、继电保护;
周宗仁(1992-),男,四川籍,硕士研究生,研究方向为新能源并网、电能质量。

环境状况变化后实时跟踪难度较大。此外,因负荷变动而造成的电压瞬变并不在预测范围内,电压的随动跟踪控制就比较困难。而且作为有级无功调控设备的电容器组虽然造价低廉,但它没有较好的无功输出性能。

本文提出了一种以监测点电压稳定为目标,运用 DFIG 机组协同 SVG 调控电压与无功的综合策略。该方案通过对监测点电压偏差的实时监测,充分发挥 SVG 无功调节迅速的特点,优先利用 SVG 进行无功调节来对监测点电压进行调控,若无功需求超出了 SVG 的调控能力,再控制 DFIG 机组进行无功功率调节,最终使监测点电压趋于稳定。然后再进一步地对无功分配的合理性进行检测并进行相应处理,以确保系统中不存在无效的无功流动。最后,结合云南丽江电网东部地区某支线的实际情况,电网中 SVG 装机容量充足且利用率低的背景条件,对本文提出的 SVG 协同风电场的电网电压稳定控制策略进行了验证,仿真结果证实了本文方法的有效性和正确性。

2 DFIG 和 SVG 的无功控制原理

2.1 DFIG 结构及无功控制

双馈风力发电机主要由风力机、增速齿轮箱、双馈异步发电机和背靠背双变流器组成^[16],转子绕组通过转子侧变流器(Rotor Side Converter, RSC)及网侧变流器(Grid Side Converter, GSC)连接电网^[2],定子绕组直接与电网连接,其并网模型结构如图 1 所示。图中 P_m 、 P_s 、 P_r 、 P_g 、 P_e 分别表示风力机经齿轮箱送入发电机的机械功率、定子产生的有功功率、转子流入 RSC 的有功功率、GSC 流入电网的有功功率、双馈风机流入电网的有功功率。

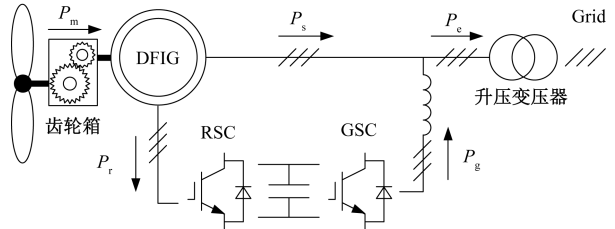


图 1 DFIG 并网模型结构图

Fig.1 Structure diagram of DFIG connected grid model

不计定、转子回路中的损耗及换流器损耗,异步发电机的转差率为 s ,则定子及转子输出有功功率与 GSC 流向电网的有功功率之间的关系为:

$$P_r = P_g = -sP_s \tag{1}$$

转子侧变流器利用矢量控制技术将发电机发出的有功功率和无功功率进行解耦^[2],其控制系统框图如图 2 所示,图中 V_{ac} 、 V_{ref} 、 Q_{ac} 、 Q_{ref} 、 I_r 、 P_{ref} 、 P_{ac} 分别为 DFIG 实测电压值、电压参考值、无功输出、无功功率参考值、转子侧电流、有功功率参考值、有功输出; I_{dr} 、 I_{qr} 分别为 I_r 的 d 轴、q 轴分量; I_{dr_ref} 、 I_{qr_ref} 分别为 I_{dr} 、 I_{qr} 的参考值。

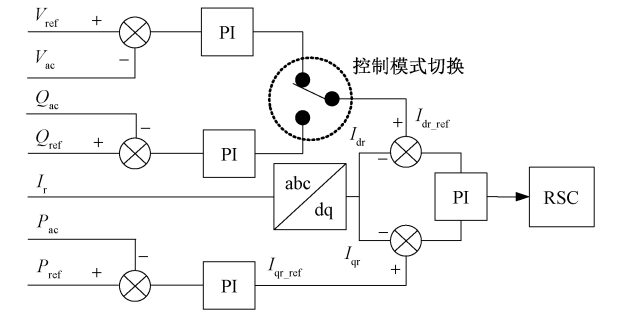


图 2 DFIG 转子侧变流器控制系统

Fig.2 Rotor side converter control system of DFIG

双馈风力发电机进行无功功率控制时可选择以发电机组端电压为目标;也可以通过指定无功输出的参考值使双馈风机工作在恒无功模式。本文采用的控制方式为后者。

网侧变流器以单位功率因数运行,同时还维持着直流侧电压的稳定^[1]。其控制系统框图如图 3 所示,图中 V_{dc} 、 V_{dc_ref} 、 I_{gc} 、 I_{q_ref} 分别为直流侧的实际电压、直流侧电压参考值、网侧变流器电流、网侧变流器无功电流基准参考值; I_{dgc} 、 I_{qgc} 分别为 I_{gc} 的 d 轴、q 轴分量; I_{dgc_ref} 为 I_{dgc} 的参考值。

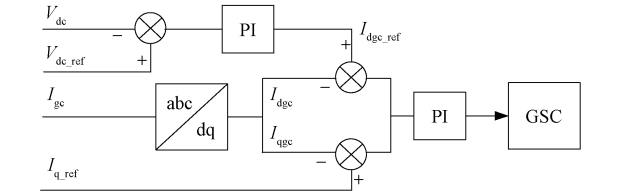


图 3 DFIG 网侧变流器控制系统

Fig.3 Grid side converter control system of DFIG

GSC 输出的无功 Q_g 、有功 P_g 与 GSC 容量 S_{gmax} 之间的约束关系式为:

$$P_g^2 + Q_g^2 \leq S_{gmax}^2 \tag{2}$$

由式(1)和式(2)得网侧变流器无功输出范围为:

$$-\sqrt{S_{gmax}^2 - (sP_s)^2} \leq Q_g \leq \sqrt{S_{gmax}^2 - (sP_s)^2} \tag{3}$$

双馈感应电机定子侧发出的有功功率 P_s 及无

功率 Q_s 在 dq 坐标下的表达式为:

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} U_s i_{ds} \\ Q_s = -\frac{3}{2} U_s i_{qs} \end{cases} \quad (4)$$

式中, U_s 为定子电压的峰值; i_{ds} 为定子电流 d 轴分量; i_{qs} 为定子电流 q 轴分量。

双馈电机定子发出功率与转子电流的关系为

$$\begin{cases} i_{dr} = \frac{2P_s L_s}{3U_s L_e} \\ i_{qr} = -\frac{2Q_s L_s}{3U_s L_e} - \frac{U_s}{\omega_s L_e} \end{cases} \quad (5)$$

式中, L_e 为励磁电感; L_s 为定子电感; i_{dr} 为转子电流的 d 轴分量; i_{qr} 为转子电流的 q 轴分量; ω_s 为定子电流角频率。

DFIG 定子侧有功和无功输出受转子电流 i_r 的限制^[7,19], 其电流最大值为 I_{rmax} , 则关系式为:

$$i_{dr}^2 + i_{qr}^2 = i_r^2 \leq I_{rmax}^2 \quad (6)$$

由式(5)和式(6)整理可得:

$$\left(\frac{3U_s^2}{2X_s} + Q_s \right)^2 + P_s^2 \leq \left(U_s I_{rmax} \frac{3X_e}{2X_s} \right)^2 \quad (7)$$

式中, $X_s = \omega_s L_s$; $X_e = \omega_s L_e$ 。当定子侧输出有功功率一定时, 其无功功率的变化范围为:

$$Q_{stmin} \leq Q_s \leq Q_{stmax} \quad (8)$$

式中, Q_{stmin} 、 Q_{stmax} 分别为定子无功功率的下限及上限。

$$\begin{cases} Q_{stmin} = -\frac{3U_s^2}{2X_s} - \sqrt{\left(U_s I_{rmax} \frac{3X_e}{2X_s} \right)^2 - P_s^2} \\ Q_{stmax} = -\frac{3U_s^2}{2X_s} + \sqrt{\left(U_s I_{rmax} \frac{3X_e}{2X_s} \right)^2 - P_s^2} \end{cases} \quad (9)$$

综合考虑双馈风机定子侧和网侧变流器发出无功功率的能力, 则 DFIG 输出无功功率范围为:

$$\begin{cases} Q_{dfigmin} = Q_{stmin} - \sqrt{S_{gmax}^2 - (sP_s)^2} \\ Q_{dfigmax} = Q_{stmax} + \sqrt{S_{gmax}^2 - (sP_s)^2} \end{cases} \quad (10)$$

式中, $Q_{dfigmin}$ 、 $Q_{dfigmax}$ 分别为 DFIG 输出无功的下限及上限。含 m 台 DFIG 的风电场发出无功的范围为:

$$\begin{cases} Q_{allmin} = \sum_{k=1}^m Q_{dfigmink} \\ Q_{allmax} = \sum_{k=1}^m Q_{dfigmaxk} \end{cases} \quad (11)$$

式中, Q_{allmin} 与 Q_{allmax} 分别为风电场输出无功的下限

和上限; $Q_{dfigmink}$ 与 $Q_{dfigmaxk}$ 分别为第 k 台双馈风机输出无功的下限和上限。

2.2 SVG 结构及无功控制

利用静止无功发生器进行无功补偿是实现电压稳定控制的最优方案, 文献[14, 20]对比分析了 SVC 及 SVG 运用于风电场的效果, SVG 动态响应和谐波特性方面的性能更加优越。

电压型 SVG 的变流器通过变压器或电抗器并联到电网系统, 其结构如图 4 所示。图 4 中 U_{SVG} 、 U_{SYS} 、 I_L 表示 SVG 电压的幅值相量、电网电压的幅值相量、SVG 流入电网的电流幅值相量; P_{SVG} 、 Q_{SVG} 、 X_L 分别表示电网流入 SVG 的有功、电网流入 SVG 的无功、SVG 的连接电抗。通过调节变流器交流侧输出电压的幅值和相位即可控制变流器输出连续可变的容性或感性无功电流, 进而实现补偿的目的。

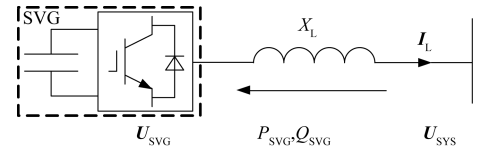


图 4 SVG 结构示意图

Fig.4 Structure diagram of SVG

电网与 SVG 之间交换的功率满足:

$$\begin{cases} P_{SVG} = (U_{SVG} U_{SYS} \sin \delta) / X_L \\ Q_{SVG} = (U_{SYS}^2 - U_{SVG} U_{SYS} \cos \delta) / X_L \end{cases} \quad (12)$$

式中, δ 为 U_{SVG} 相对于 U_{SYS} 的相位; U_{SVG} 、 U_{SYS} 分别为 U_{SVG} 、 U_{SYS} 的幅值。

稳态运行时, $\delta = 0$, $P_{SVG} = 0$, 此时无功功率表达式可进一步简化^[20]。SVG 在空载、容性和感性运行模式下输出电流、输出电压和系统电压关系如图 5 所示。 u_{svg} 、 u_{sys} 、 i_l 为 U_{SVG} 、 U_{SYS} 、 I_L 对应的正弦量。

结合式(12), 当 $U_{SVG} = U_{SYS}$ 时, $i_l = 0$, SVG 运行于空载模式, 即 SVG 与电网之间不交换无功功率; 当 $U_{SVG} > U_{SYS}$ 时, i_l 为超前的电流, 从电网流入 SVG 的无功 $Q_{SVG} < 0$, 即 SVG 发出无功, 运行于容性模式; 当 $U_{SVG} < U_{SYS}$ 时, i_l 为滞后的电流, 从电网流入 SVG 的无功 $Q_{SVG} > 0$, 即 SVG 吸收无功, 运行于感性模式。

SVG 的简化控制框图如图 6 所示, 图 6 中 V_1 、 V_{1ref} 、 I 、 Q_1 、 Q_{1ref} 、 V_{cc} 、 V_{ccref} 分别为 SVG 接入电网点电压值、电压参考值、流入电流测量值、无功功率发生量、无功功率参考值、直流电压测量值、直流电压参考值; I_d 、 I_q 分别为 I 的 d 轴、q 轴分量; I_{dref} 、 I_{qref} 分别为 I_d 、 I_q 的参考值。

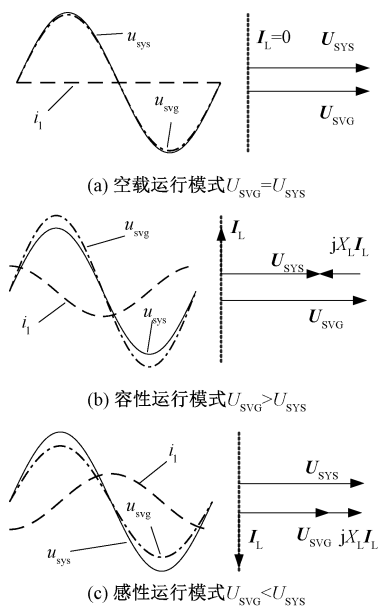


图 5 SVG 运行模式波形和相量图

Fig.5 Waveform and phasor diagram of SVG operation mode

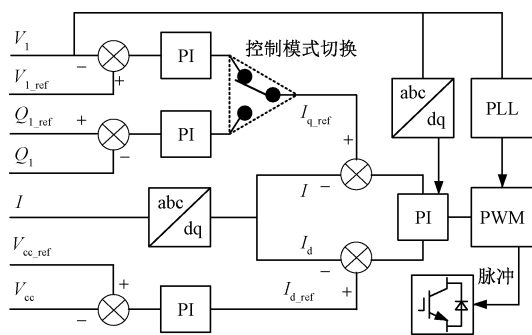


图 6 SVG 控制系统框图

Fig.6 Control system block diagram of SVG

在不同控制场景中,通过指定 SVG 的无功参考值或电压参考值,可以让 SVG 运行于不同的工作模式^[13]。在恒电压模式下,SVG 动态地调节自身输出的无功功率来实现跟踪电压设定值的目标;在恒无功模式下,SVG 仅按照设定的无功功率参考值进行无功输出。在本文中为实现相应的控制功能,将 SVG 设置为恒无功运行模式。

在 DFIG 风电机组并网系统中要使用无功补偿设备来满足系统对无功的要求,若无功补偿设备配置容量不足则容易对系统电压的稳定造成影响。采用无功调控能力优越的 SVG 与风电场共同进行无功补偿可以很好地实现无功及电压的控制。在无功容量充足的情况下,若只是让 SVG 和风电场各行其是地发挥自身的无功补偿能力,可能会因它们补偿特性的不同而造成电压不稳定的情况。因此,设计

一个合理的 SVG 协同 DFIG 机组进行无功控制的策略非常重要。

3 SVG 与风电场的协同控制方法

3.1 协同控制架构

在系统监测点电压因某种因素而波动时,需要系统内无功补偿设备及风电机组对无功进行补偿以稳定监测点电压,考虑无功补偿装置容量充足的情况,充分发挥 SVG 动态响应迅速的优势,优先考虑 SVG 的作用,把 DFIG 的无功出力作为备用容量。在 SVG 无功补偿不能满足要求的时候再动作 DFIG 补偿无功,DFIG 各机组输出无功遵循等功率因数原则,而无功需求在 SVG 调节能力范围内时,则不动作 DFIG。此时 DFIG 运行在单位功率因数状态以发出更多的有功功率,一方面能够充分发挥 SVG 的作用,另一方面也保证了风电场有足够的有功出力。

本文所述的 SVG 和 DFIG 协同调节电压的一般控制架构如图 7 所示。图 7 中 U 、 U_{ref} 、 ΔU_{ref} 、 Q_{svg} 、 Q_{svg_ref} 、 Q_{dfig_ref1} 、 Q_{dfig_ref2} 表示监测点电压实测值、电压参考值、电压偏差、SVG 无功发生量、SVG 无功参考值、DFIG1 无功参考值、DFIG2 无功参考值; Q_{SVGmax} 、 Q_{SVGmin} 为 SVG 发出无功的上限及下限。基本思路是对电压偏差进行整定,快速投入 SVG 补偿无功,SVG 满载后再控制 DFIG 机组参与无功调节。此过程中,实时电压 U 在不断趋近 U_{ref} ,SVG 和 DFIG 机组也逐渐趋于稳定输出,最终使 U 稳定在设置的死区范围内。当电压稳定之后,再对无功分配合理性进行检测,通过无功协调模块进行无功重分配,消除不必要的无功流动。

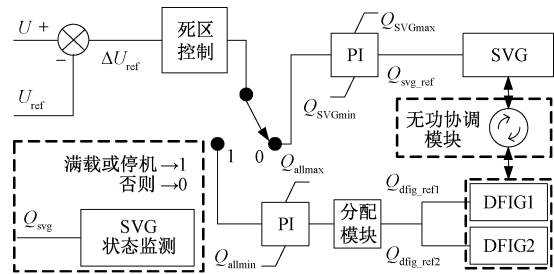


图 7 电压协同调节架构

Fig.7 Voltage cooperative regulation architecture

3.2 SVG 与风电场的综合无功控制策略

针对不同情况,控制系统对当前状态进行条件判断,采取不同的控制措施,具体的控制策略流程图如图 8 所示。

在控制的初始阶段,需要采集监测点电压值 U ,

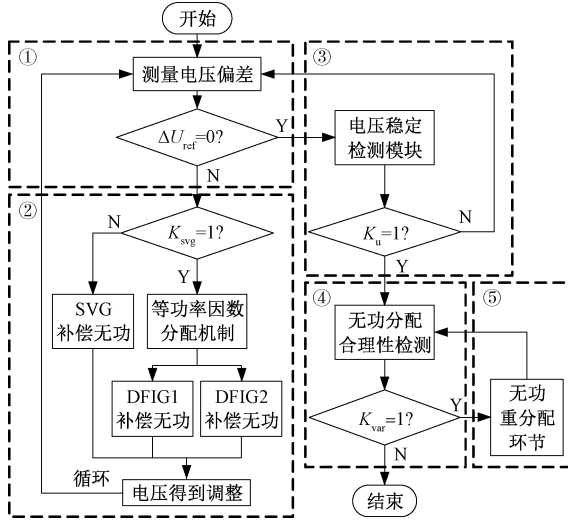


图 8 综合无功控制策略流程图

Fig.8 Flow chart of integrated reactive power control strategy

与电压参考值对比,因此需要指定电压参考值与电压允许偏差范围,2种给出方式如下:

(1) 直接给出电压参考值 U_{ref} 及偏移范围 U_{ref_dev} ,此时死区上限 U_{dzmax} 、下限 U_{dzmin} 为:

$$\begin{cases} U_{dzmax} = U_{ref} + U_{ref_dev} \\ U_{dzmin} = U_{ref} - U_{ref_dev} \end{cases} \quad (13)$$

(2) 给出死区上限和下限,电压参考值为:

$$U_{ref} = \frac{1}{2}(U_{dzmax} + U_{dzmin}) \quad (14)$$

电压偏差 ΔU_{ref} 的取值为:

$$\Delta U_{ref} = \begin{cases} 0 & U_{dzmin} \leq U \leq U_{dzmax} \\ U - U_{ref} & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

当 $\Delta U_{ref} \neq 0$ 时,则优先动作 SVG 调节无功功率对电压进行调控,是否动作 DFIG 需要根据 SVG 的状态(K_{svg})来确定, K_{svg} 的取值为:

$$K_{svg} = \begin{cases} 1 & K_{svg_FL} = 1 \text{ 或 } K_{svg_Trip} = 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

式中, K_{svg_Trip} 表示 SVG 的停机标志,SVG 离网时 $K_{svg_Trip} = 1$,反之 $K_{svg_Trip} = 0$; K_{svg_FL} 表示 SVG 的满载标志,通过监测 SVG 的实际无功发生量 Q_{svg} 来确定,按标么值计算,取 SVG 容量 $Q_{svg_max} = 1$,引入 SVG 满载系数 $m_f \in (0.9, 1]$,一般 m_f 的取值接近 1,则可确定 K_{svg_FL} 如下:

$$K_{svg_FL} = \begin{cases} 1 & |Q_{svg}| > m_f Q_{svg_max} = m_f \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

当 $K_{svg_FL} = 1$ 且 $\Delta U_{ref} \neq 0$ 时,需要动作 DFIG 来提供无功,通过监测 DFIG1 和 DFIG2 的实际有功出

力,遵循等功率因数原则来分配风电机组的无功出力,DFIG 机组的无功调整量表达式为:

$$Q_{dfig_refi} = Q_{dfig_ref} P_{dfig_mi} / \sum_{k=1}^2 P_{dfig_mk} \quad (18)$$

式中, i 和 k 为 DFIG 机组编号,取值为 1 和 2; P_{dfig_mi} 为第 i 组 DFIG 的实际有功出力; Q_{dfig_ref} 为 DFIG 机组的总无功参考值; Q_{dfig_refi} 为第 i 组 DFIG 的无功参考值,通过实时控制让 DFIG1 和 DFIG2 保持等功率因数运行,均匀地输出无功功率。

当 $\Delta U_{ref} = 0$ 时,表示电压 U 进入死区范围,但是电压是否将持续保持在死区范围内则需要通过电压稳定检测模块进行确定, K_u 为电压稳定标志, $K_u = 1$ 表示电压稳定,反之 $K_u = 0$ 表示电压不稳定。若从 t_1 时刻开始持续 Δt 时间内均有 $\Delta U_{ref} = 0$,则在 $t_2 = t_1 + \Delta t$ 时刻 $K_u = 1$; 而任何时候当 $\Delta U_{ref}(t) \neq 0$ 时,则 $K_u = 0$ 。 K_u 取值表述为:

$$K_u = \begin{cases} 1 & \Delta U_{ref}(t) = 0 \text{ 且 } t \in [t_1, t_1 + \Delta t] \\ 0 & \Delta U_{ref}(t) \neq 0 \end{cases} \quad (19)$$

通过无功调整后,电压趋于稳定,但是存在一种不利的情况,即故障时 SVG 和 DFIG 机组参与电压调节,同时吸收或发出无功功率;故障切除后,由于 SVG 优先动作而进行反向无功调节,以致 SVG 和 DFIG 机组两者之一吸收无功,而另一个发出无功。为避免此类无效的无功交换,需对无功分配情况进行检测以确定无功是否需要重新分配。本文设置 K_{var} 为无功重分配标志, $K_{var} = 1$ 表示需要进行无功重分配, $K_{var} = 0$ 则不需要。 K_{var} 的取值为:

$$K_{var} = \begin{cases} 1 & H(Q_{svg})H(Q_{dfig}) \leq 0 \text{ 且 } H(Q_{dfig}) \neq 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (20)$$

式中, Q_{dfig} 为 DFIG 实际无功发生量; $H(*)$ 为符号检测函数,零半径参数 Z_{eps} 为很小的正数,函数 H 的表达式为:

$$H(x) = \begin{cases} 1 & x \geq Z_{eps} \\ 0 & |x| < Z_{eps} \\ -1 & x \leq -Z_{eps} \end{cases} \quad (21)$$

若 $K_u = 1$ 且 $K_{var} = 1$,则进入无功功率重分配环节,在该环节中重新设定 DFIG 的无功参考值,同时 SVG 会根据电压的变化不断地调整自身的无功输出。为保证无功重分配过程中电压不出现大幅度波动,因此需要重新设置重分配过程的电压参考值 U_{rr} 及偏移范围 U_{rr_dev} ,其表达式为:

$$U_{rr} = 0.65U_{ksr} + 0.35U_{ref} \tag{22}$$

$$U_{rr_dev} = 0.1U_{ref_dev} \tag{23}$$

式中, U_{ksr} 为启动无功重分配时监测点的电压值, 此时电压偏差 ΔU_{rr} 的表达式为

$$\Delta U_{rr} = \begin{cases} 0 & |U - U_{rr}| \leq U_{rr_dev} \\ U - U_{rr} & \text{其他} \end{cases} \tag{24}$$

在无功重分配过程中, 当 $\Delta U_{rr} \neq 0$ 时 SVG 则迅速动作进行无功补偿来平抑电压的波动, 直到 $K_{var} = 0$ 时结束无功重分配。

整个无功协调控制的过程以监测点电压为控制目标, 结合图 8 可描述其基本实现步骤如下。

步骤①: 采集监测点电压 U 并由式 (15) 判断监测点电压是否满足要求, 如果电压未达标准 ($\Delta U_{ref} \neq 0$), 则转步骤②; 否则转步骤③。

步骤②: 进行无功补偿, 通过式 (16) 及式 (17) 判断 SVG 的状态, 如果 SVG 无功余量充足则优先使用 SVG 对电压进行支撑; 否则利用风电机组进行无功补偿, 各机组的无功出力受式 (18) 约束。由此电压得到调整, 转步骤①循环检测电压。

步骤③: 由式 (19) 判断电压是否持续稳定, 如果电压保持稳定 ($K_u = 1$), 则转步骤④进入无功分配合理性检测环节; 否则转步骤①。

步骤④: 结合式 (20) 及式 (21) 判断 SVG 与 DFIG 机组无功分配的合理性, 如果 $K_{var} = 1$ 则转步骤⑤进行无功重分配; 如果 $K_{var} = 0$, 则表明 DFIG 机组和 SVG 之间没有不必要的无功流动, 协同调节过程结束。

步骤⑤: 设定 $Q_{dfig_ref} = 0$, 由式 (22) ~ 式 (24) 确定无功重分配过程的电压死区, 此时 SVG 会自动改变自身的无功出力以保持电压稳定, 转步骤④重复检测无功分配的情况。

4 算例

本文建立了含 SVG 和 DFIG 风电场的仿真模型, 其接线图如图 9 所示。图 9 中 T1、T2 和 T3 为变压器; SVG 接在 35 kV 母线上, 经由传输线接入电网; 风电场, SVG 和监测点均有检测装置, 并通过信号线接入控制室。Grid 为丽江电网东部地区支网, SVG 配置容量为 20 MV·A, 可变负荷在 30 MVar (容性) 至 30 MVar (感性) 之间连续可调, 风电场的装机总容量为 45 MW, 按其分布情况划分为机组 DFIG1 (含 20 台 1.5 MW 双馈风机) 和机组 DFIG2 (含 10 台 1.5 MW 双馈风机), DFIG 的额定风速为 12 m/s。

仿真参数设置见表 1。

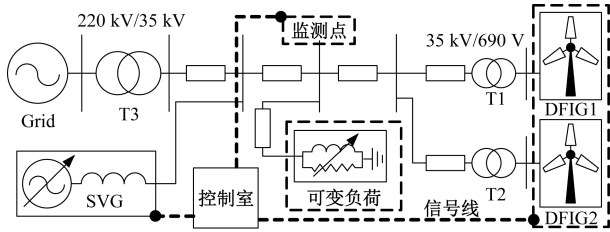


图 9 风电场仿真模型接线图
Fig.9 Wiring diagram of wind farm simulation model

表 1 仿真相关参数

电压参数			判断参数	
参考值	偏移范围	持续稳定	SVG 满载	零区半径
$U_{ref}(\text{pu})$	$U_{ref_dev}(\text{pu})$	时间 $\Delta t/\text{s}$	系数 m_f	参数 Z_{eps}
1.0	0.025	0.2	0.96	0.01

下面根据负荷变化及风速情况的不同, 分 4 个场景研究电力系统中有负荷突变或风速变化时, 监测点的电压波动情况以及在 SVG 和 DFIG 机组作用下的改善效果。

场景 1: 设定风速为 12 m/s, 为模拟小负荷变化的情形, 设置 20 s 时可变负荷由 0 MVar 突变为 10 Mvar (感性)。监测点的电压曲线如图 10 所示, 相关的电压情况见表 2。

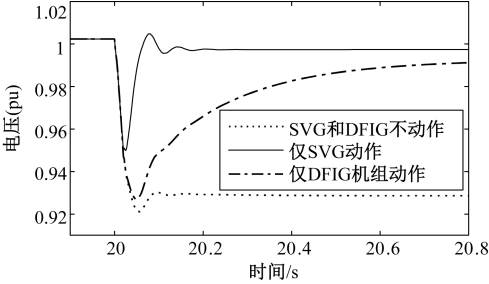


图 10 小负荷变化时监测点电压曲线
Fig.10 Voltage curves of monitoring point in case of small load change

表 2 小负荷变化时电压情况

控制情况	电压最低值 (pu)	电压稳定值 (pu)
SVG 和 DFIG 不动作	0.921	0.929
仅 SVG 动作	0.950	0.998
仅 DFIG 机组动作	0.927	0.991

由图 10 及表 2 可看出, 当感性负荷突增导致监测点的电压跌落时, SVG 的补偿效果更好, 电压的跌落量也更小。

场景 2:为模拟大负荷变化的情形,设置 20 s 时可变负荷由 0 MVar 突变为 30 MVar(感性),DFIG1 及 DFIG2 所在区域的风速变化情况如图 11 所示。

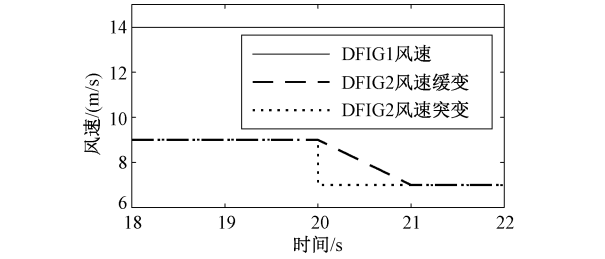


图 11 DFIG 风速变化曲线

Fig.11 DFIG wind speed change curves

风速缓变时,几种补偿方式下的监测点电压曲线如图 12 所示,相关的电压情况见表 3。

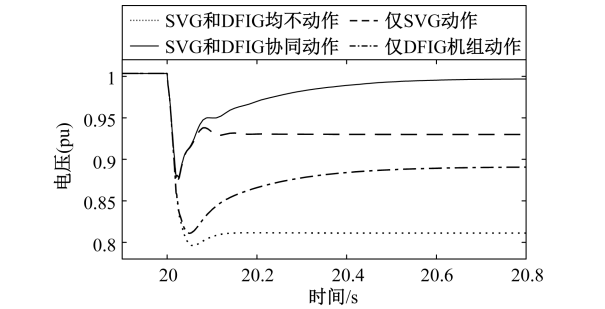


图 12 大负荷变化时监测点电压曲线

Fig.12 Voltage curves of monitoring point in case of large load change

表 3 大负荷变化时电压情况

Tab.3 Voltage under large load change

控制情况	电压最低值(pu)	电压稳定值(pu)
SVG 和 DFIG 均不动作	0.797	0.811
仅 SVG 动作	0.876	0.93
仅 DFIG 机组动作	0.811	0.89
SVG 和 DFIG 协同动作	0.879	0.997

由图 12 及表 3 可看出,当负荷超过 SVG 或 DFIG 的无功容量时,仅使用其中一对无功进行补偿,电压虽然有所提高但未能达到标准。而 SVG 和 DFIG 机组协同动作能够将电压提高到设定的范围内,SVG 的快速动作可以迅速拉升监测点电压,补偿效果良好。

在 DFIG2 风速缓变及突变的情况下,施加等功率因数控制前后的机组功率因数曲线如图 13 所示,相应的功率因数情况见表 4。

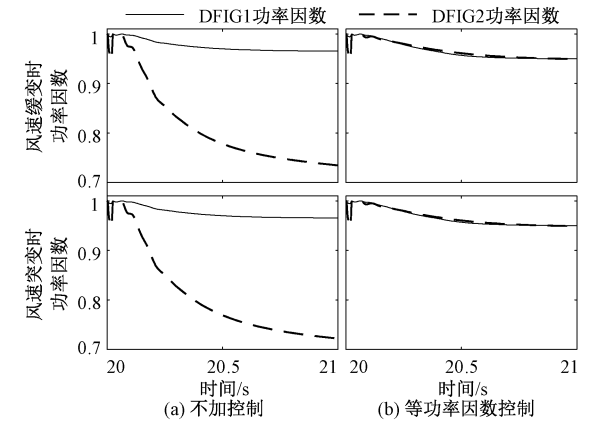


图 13 DFIG 机组功率因数曲线

Fig.13 Power factor curves of DFIG unit

表 4 DFIG 机组功率因数情况

Tab.4 Power factor of DFIG unit

控制情况	风速缓变		风速突变	
	DFIG1	DFIG2	DFIG1	DFIG2
不加控制	0.966	0.735	0.966	0.722
等功率因数控制	0.95	0.949	0.95	0.949

由图 13 及表 4 可看出,当采取等功率因数分配策略时,DFIG 机组在风速不稳定的情况下能较好地保持等功率因数运行,DFIG 机组分担的无功更加均匀。若不加控制,则可能出现某个机组的功率因数过低,特别是风速突变时,功率因数会比风速缓变时更低。

场景 3:设定 DFIG1、DFIG2 的风速分别为 14 m/s 和 12 m/s,为模拟负荷投切的情形,设置 20 s 时可变负荷由 0 MVar 突变为 30 MVar(感性),21 s 时突变为 0 MVar。是否采取无功重分配操作的 2 种情况下,监测点电压曲线如图 14 所示,SVG 和 DFIG 机组总无功出力曲线如图 15 所示,电压及无功出力情况见表 5。

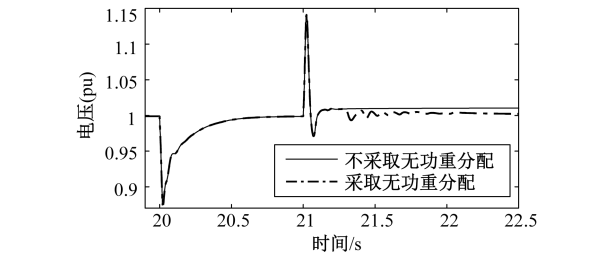


图 14 负荷投切时监测点电压曲线

Fig.14 Voltage curves of monitoring point during load switching

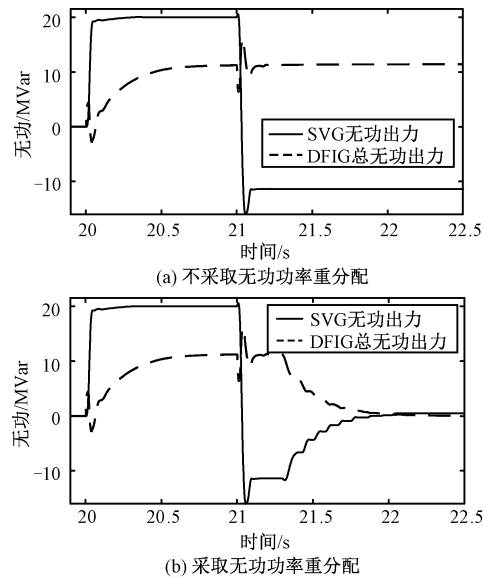


图 15 负荷投切时无功曲线

Fig.15 Curves of reactive power during load switching

表 5 负荷投切时电压及无功情况

Tab.5 Voltage and reactive power during load switching

控制情况	电压 稳定值 (pu)	无功出力/MVar	
		SVG	DFIG
不采取无功重分配	1.01	-11.37	11.43
采取无功重分配	1.002	0.476	0.027

由图 14、图 15 及表 5 可看出,在 21 s 负荷被切除后,如果不进行无功重分配,电压虽然稳定无波动,但此时 DFIG 发出无功而 SVG 吸收无功,大量无功从 DFIG 流向 SVG;如果采取无功重分配,电压虽有细微的波动但始终在允许的范围内,并且消除了 SVG 与 DFIG 之间不必要的无功流动。

场景 4: 设定 DFIG1、DFIG2 的风速分别为 14 m/s 和 12 m/s,为模拟负荷性质变化的情形,设置 20 s 时可变负荷由 0 MVar 突变为 30 MVar(感性),21 s 时突变为 10 MVar(容性)。图 16 为监测点电压曲线,图 17 为 SVG 和 DFIG 机组总无功出力曲线,电压及无功出力情况见表 6。

表 6 负荷性质变化时电压及无功情况

Tab.6 Voltage and reactive power when load property changes

控制情况	电压 稳定值 (pu)	无功出力/Mvar	
		SVG	DFIG
不采取无功重分配	1.022	-19.96	10.62
采取无功重分配	1.012	-9.467	0.008

由图 16、图 17 及表 6 可看出,在负荷性质发生

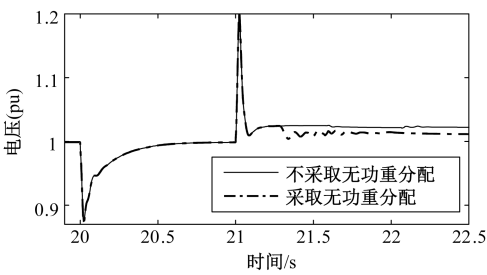


图 16 负荷性质变化时监测点电压曲线

Fig.16 Voltage curves of monitoring point when load property changes

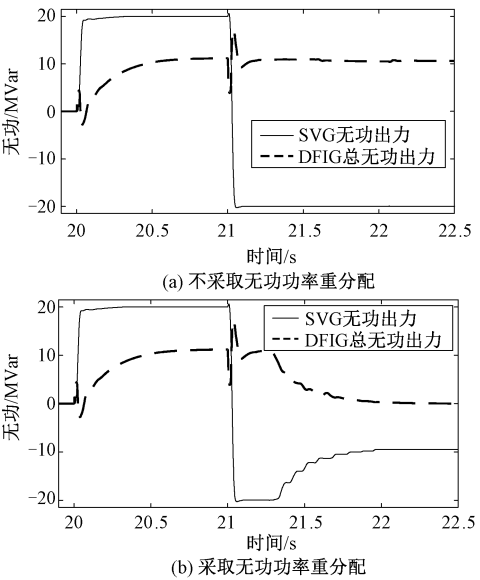


图 17 负荷性质变化时无功曲线

Fig.17 Curves of reactive power when load property changes

变化后,若不进行无功功率重分配,SVG 吸收了 DFIG 和容性负荷产生的无功,而事实上此时 DFIG 产生无功是不必要的;在采取无功功率重分配后,电压虽然有细微波动但符合要求,DFIG 机组几乎不再发出无功,消除了 SVG 与 DFIG 之间不必要的无功流动。

5 结论

本文给出了 SVG 和 DFIG 机组协同调节监测点电压的控制模式和电压调节策略,得出结论如下:

(1) 冲击负荷较小时,优先采用 SVG 补偿无功能够快速响应电压变化,电压稳定效果良好;冲击负荷较大而 SVG 或 DFIG 机组不能单独供给足够的无功时,通过 SVG 和 DFIG 机组的协同有序动作,能够降低电压瞬变幅度,缩小电压稳定所耗时间,使监测点电压稳定在期望范围内。

(2)电压稳定期间,在可能出现的无功功率分配不理想的情况下,通过 SVG 和 DFIG 机组的协同调节作用,以电压的细微波动为代价来消除不必要的无功流动,可让 SVG 和 DFIG 机组恢复到良好的工作状态以应对后续的电压波动事件。

(3)仿真结果表明,冲击负荷为 10 MVar(感性)时,仅使用 SVG 调节电压至期望范围约耗时 0.04 s,而单独使用 DFIG 机组则需耗时约 0.28 s;冲击负荷为 30 MVar(感性)的情况下,SVG 单独作用时电压稳定值为 0.93 pu,DFIG 机组单独作用时电压稳定值为 0.89 pu,而 SVG 和 DFIG 机组的协同作用可使电压稳定值提升到 0.99 pu 以上。

(4)在 DFIG 机组之间采用等功率因数分配机制可使各机组在风速不稳定时功率因数不至于过低,施加控制之前机组的功率因数最低为 0.72,施加控制之后机组的功率因数最低可达 0.95,机组出力更均匀。

参考文献 (References):

[1] 秦涛,吕跃刚,徐大平 (Qin Tao, Lü Yuegang, Xu Daping). 采用双馈机组的风电场无功功率控制技术 (Reactive power control of wind farm adopting doubly-fed induction generators) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2009, 33 (2): 105-110.

[2] 贾俊川,刘晋,张一工 (Jia Junchuan, Liu Jin, Zhang Yigong). 双馈风力发电系统的新型无功优化控制策略 (Novel reactive power optimization control strategy for doubly fed induction wind power generation system) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2010, 30 (30): 87-92.

[3] 李晶,方勇,宋家骅,等 (Li Jing, Fang Yong, Song Jiahua, et al.). 变速恒频双馈风电机组分段分层控制策略的研究 (Research on subsection and layer control strategy of doubly-fed variable speed wind turbine) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2005, 29 (9): 15-21.

[4] 张俊武,王德林,刘柳,等 (Zhang Junwu, Wang Delin, Liu Liu, et al.). 基于变参数 PI 控制的双馈风电机组频率控制策略 (Control strategy of high penetrance wind power out of frequency regulation based on variable parameter PI control) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (12): 9-17.

[5] 郎永强,张学广,徐殿国,等 (Lang Yongqiang, Zhang Xueguang, Xu Dianguo, et al.). 双馈电机风电场无功功率分析及控制策略 (Reactive power analysis

and control of doubly fed induction generator wind farm) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2007, 27 (9): 77-82.

[6] Zhai J J, Liu H M. Reactive power control strategy of DFIG wind farms for regulating voltage of power grid [A]. 2014 IEEE Power & Energy Society General Meeting [C]. Washington D. C., USA, 2014. 1-5.

[7] 王松,李庚银,周明 (Wang Song, Li Gengyin, Zhou Ming). 双馈风力发电机组无功调节机理及无功控制策略 (The reactive power adjusting mechanism & control strategy of doubly fed induction) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2014, 34 (16): 2714-2720.

[8] 曹军,张榕林,林国庆,等 (Cao Jun, Zhang Ronglin, Lin Guoqing, et al.). 变速恒频双馈电机风电场电压控制策略 (A voltage control strategy for wind farms using doubly fed induction generator wind turbines) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2009, 33 (4): 87-91.

[9] 王玉婷,李鹏 (Wang Yuting, Li Peng). 大规模风电并网无功电压协调控制策略研究 (Study on reactive power and voltage coordinated control strategy for power system with large-scale wind power integration) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (3): 47-55.

[10] Tapia A, Tapia G, Ostolaza J X. Reactive power control of wind farms for voltage control applications [J]. Renewable Energy, 2004, 29: 377-392.

[11] Kayikci M, Milanovic J V. Reactive power control strategies for DFIG-based plants [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22 (2): 389-396.

[12] 付文秀,范春菊 (Fu Wenxiu, Fan Chunju). SVG 在双馈风力发电系统电压无功控制中的应用 (Application of SVG in voltage and reactive power control of doubly-fed induction generation system) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2015, 43 (3): 61-68.

[13] 郑伟,拜润卿,宋磊,等 (Zheng Wei, Bai Runqing, Song Lei, et al.). 静止无功发生器在风电场电网中的应用研究 (The applied research of SVG in wind power system) [J]. 电力电子技术 (Power Electronics), 2012, 46 (4): 35-37.

[14] 王钢,赵莉君,李捷,等 (Wang Gang, Zhao Lijun, Li Jie, et al.). 静止无功发生器在风电场电网中的应用研究 (Application research of static var generator in wind power system) [J]. 工矿自动化 (Industry and Mine Automation), 2012, 38 (9): 63-66.

[15] 邢作霞,刘志武,郭永库,等 (Xing Zuoxia, Liu Zhi-

wu, Guo Yongku, et al.). 基于 SVG 的风电场无功补偿经济运行方法研究 (Wind farm reactive power compensation based on SVG method research of economic operation) [J]. 可再生能源 (Renewable Energy Resources), 2014, 32 (5): 593-598.

[16] 邹赞 (Zou Yun). 基于 SVG 的 DFIG 风电场无功补偿策略研究 (Research on reactive power compensation strategy of DFIG wind farm with SVG) [D]. 乌鲁木齐: 新疆大学 (Urumqi: Xinjiang University), 2018.

[17] 邹赞, 王维庆, 王海云 (Zou Yun, Wang Weiqing, Wang Haiyun). 基于 SVG 的双馈风电场电压稳定控制策略研究 (Research on voltage stability control strategy for DFIG wind farm with SVG) [J]. 电机与控制应用 (Electric Machines & Control Application), 2018, 45 (7): 116-121.

[18] 黄辉先, 盛权, 欧阳宁烽 (Huang Huixian, Sheng Quan, Ouyang Ningfeng). 风电场的无功功率调度控制策略研究 (The study of wind farm reactive power dispatching control strategy) [J]. 控制工程 (Control Engineering of China), 2013, 20 (6): 1106-1109, 1113.

[19] 杨桦, 梁海峰, 李庚银 (Yang Hua, Liang Haifeng, Li Gengyin). 含双馈感应电机的风电场电压协调控制策略 (A coordinated voltage control strategy for wind farm containing doubly fed induction generators) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2011, 35 (2): 121-126.

[20] 郑海涛, 郑昕, 吴兴全, 等 (Zheng Haitao, Zheng Xin, Wu Xingquan, et al.). 大型并网风电场和光伏电站内动态无功补偿的应用技术分析 (Technical analysis of dynamic reactive power compensation equipment applied in large-scale grid connected wind power plant and photovoltaic substation) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2014, 42 (16): 149-154.

Study on voltage stability control strategy of power grid with SVG coordinated wind farm

YANG Lei¹, ZHOU Zong-ren², GUO Cheng¹, ZHOU Xin¹, HE Xin¹, HUANG Wei³,
HE Peng¹, WANG De-lin²

- (1. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China;
- 2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;
- 3. Yunnan Power Dispatch Center, Kunming 650011, China)

Abstract: In order to solve the problem of voltage deviation and fluctuation caused by external factors in power grid including wind farm and SVG, a comprehensive strategy of voltage coordinated control by using SVG and DFIG wind farm is proposed. According to the voltage fluctuation of the monitoring point, the SVG and DFIG are controlled by PI control and logic selection when the voltage suddenly rises or falls, and the framework and process of the whole regulating system are given. By making full use of the rapidity of SVG in regulating reactive power, SVG is preferentially used to output reactive power to support the voltage at the monitoring point. If the regulation capacity of SVG is exceeded, the DFIG is controlled to output reactive power under the premise that the DFIG meets the specified power factor, and finally the voltage support for the monitoring point is realized. After the voltage stability is detected, it is also necessary to judge the rationality of reactive power distribution and redistribute reactive power under the existing adverse conditions to avoid unnecessary reactive power flow, which improves the operation stability of the grid after the wind farm is connected.

Key words: wind farm; SVG; coordinated control; voltage support; reactive redistribution