

SVG 在双馈风力发电系统电压无功控制中的应用

付文秀¹, 范春菊²

(1. 中国船舶重工集团公司第七〇四研究所, 上海 200031; 2. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘要: 双馈风力发电机在国内外的风力发电实际应用中逐渐取代同步发电机和笼型异步发电机, 由于风力发电并网时出力的随机波动性, 给配电系统的电压无功带来了很大的影响。考虑双馈风力发电机自身的无功输出特点, 研究了 SVG 在其电压无功控制时的应用, 详细探讨了 SVG 并网时的关键技术点, 包括控制结构模型、容量的选取以及主要参数的确定。通过 IEEE9 节点的配电网络数据, 在 PSCAD 中进行实例仿真, 验证了所提出方法的有效可行性, 为 SVG 在双馈风力发电系统电压无功控制中的应用提供了依据。

关键词: 双馈风力发电机; 随机波动; SVG; 容量参数; PSCAD

Application of SVG in voltage and reactive power control of doubly-fed induction generation system

FU Wenxiu¹, FAN Chunju²

(1. No. 704 Institution of CSIC, Shanghai 200031, China; 2. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Doubly-fed induction generator (DFIG) is gradually replacing synchronous generator and squirrel-cage induction generator in the practical application both at home and abroad, and due to the random fluctuations of wind resources, it brings a big impact to the voltage and reactive power of the distribution network. Considering the reactive power output characteristics of doubly-fed wind generator, the application of SVG in stabilizing node voltage and reactive power control is discussed in detail and key technical points of static var generation (SVG) when connected to distribution network is studied, including control structure model, capacity selection and key parameters determination. With the simulation of IEEE9 distribution network in PSCAD, the effectiveness and feasibility of the proposed method are verified, providing a theoretical and practical value for the widely application of DFIG in the distribution network.

Key words: DFIG; random fluctuations; SVG; capacity parameter; PSCAD

中图分类号: TM614 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)03-0061-08

0 引言

由于我国风能充足的地理特点, 风力发电具有很高的实用性, 而双馈式风力发电机 DFIG 作为一种变速恒频式异步发电机, 由于其造价适中, 容易实现并网运行, 同时具有一定的无功补偿作用等特点, 逐渐取代笼型异步风力发电机和永磁同步风力发电机^[1-5]。但是, 当 DFIG 接入配电网后, 风力资源的环境依赖性而导致的众多不确定性以及 DFIG 并网时自身的运行特性, 将会导致配电系统节点电压的频繁波动和闪变, 严重影响配电系统的电能质量^[6-13]。

DFIG 并入配电网时, 如果仅仅采用一般的动态无功补偿装置, 如同步调相机和常用的并联电容器

等, 对风力发电机组进行投切补偿, 则会存在低压特性不好, 调制精度不高, 损耗比较大, 响应速度慢且在很多情况下维护复杂等一系列问题, 这将会导致整个配电网络的电压水平的恶化, 严重情况下甚至导致整个系统发生崩溃^[14-15]。

因此, 对于不确定因素反应的迅速性和精确性, 决定了对于双馈风力发电机组并网时必须采用动态补偿装置来及时满足风电机组出力的随机性的需求。而现有的 DFIG 并网的风电场中, 静止无功发生器 SVG 作为一种既可以发出容性无功来补偿 DFIG 满发时线路上的感性无功, 又可以发出感性无功来补偿空载时线路的充电无功的动态补偿装置, 具有响应速度快, 谐波特性优越, 性价比高等一系列优点, 能够很好地

满足风电场接入电网技术规定中的无功配置要求^[16-18]。目前,针对于利用 SVG 动态补偿时的一些关键技术点,包括 SVG 内部主要参数的设计、并网容量的选取以及控制模型的搭建的研究较为模糊,SVG 在 DFIG 并网时的应用的研究需要更为深入的探讨^[19-20]。

本文详细分析了 DFIG 并网时对配电系统电压无功带来的影响,在考虑 DFIG 并网时自身输出无功功率特性的同时,提出了一种利用静态无功发生器 SVG 来稳定 DFIG 并网节点电压的稳定性的控制方式,并深入研究了 SVG 并网时的关键技术点,包括 SVG 并网的控制模型、并网容量以及并网时主要参数的选取依据。最后,结合 IEEE9 节点的配电网数据,通过在 PSCAD 中搭建实例模型,验证了本文方法的有效可行性。

1 双馈式风力发电机(DFIG)的出力特点

1.1 DFIG 的有功出力特点

DFIG 从自然风能中能够捕获的功率为

$$P_w = \frac{\rho}{2} C_p(\lambda, \theta_p) A_t v_w^3 \quad (1)$$

式中: P_w 为风机的功率; ρ 为空气密度; C_p 为风能利用系数; λ 为叶尖的速度比(风轮叶尖速度与风速的比值); θ_p 为桨距角; $A_t = \pi R^2$ 为风轮的扫风面积。

可见,DFIG 可利用的有功功率受叶片的面积、空气密度、风速等多种因素的影响,随着各种不确定性因素的改变可能发生很大变化。而实际中,DFIG 的有功出力是与风速直接相关的,图 1 为 DFIG 近似的功率特性曲线。

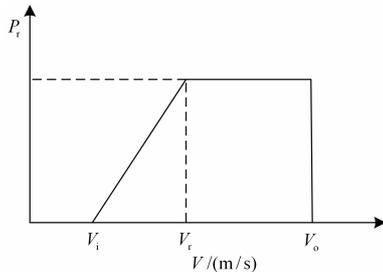


图 1 DFIG 的近似有功功率特性曲线

Fig. 1 Approximate power characteristic curve of DFIG

其中: P_r 为 DFIG 的额定输出功率; V 为实际风速; V_r 为 DFIG 的额定风速; V_i 、 V_o 分别为 DFIG 的切入和切出风速。

一般在实际应用中,生产厂商在出厂的时候都会提供每台 DFIG 的功率特性曲线,因而,DFIG 的有功

出力是可以根据其特性曲线求出的,从而根据统计公式和风能公式计算得到对应的实际风力发电功率。

1.2 DFIG 的无功出力极限

DFIG 并入配电网时,是通过定子侧直接并网和转子侧的逆变并网实现的双侧并网连接,因此 DFIG 总有功出力 P 是由其直接并网侧的出力 P_s 和逆变并网侧的出力 P_r 共同决定,即 $P = P_s + P_r$ 。一般情况下,DFIG 两侧的有功出力输出满足关系式 $P_r = -sP_s$, 式中 s 为 DFIG 的转差率,所以得到 DFIG 总有功出力用 P_s 表示为 $P = (1-s)P_s$ 。DFIG 的无功出力为其定子侧无功出力 and 逆变器并网的转子侧无功出力的代数和,但是, PWM 逆变器一般情况下传递的无功功率较小,通常可以忽略不计,故 DFIG 向待补偿的配电系统中注入的无功功率 Q 可表示为 $Q = Q_s$ 。根据功率平衡,DFIG 并网时需满足方程式:

$$P_s^2 + Q_s^2 = (3U_s I_s)^2 \quad (2)$$

由于逆变器自身的特性, PWM 逆变器的交流侧受到其最大电流值的限制,即转子侧的输出电流需满足:

$$P_s^2 + (Q_s + 3 \frac{U_s^2}{X_s})^2 \leq (3 \frac{X_M}{X_s} U_s I_{Rmax})^2 \quad (3)$$

式中: U_s 为 DFIG 并网节点定子侧的节点电压; I_s 为流过定子绕组的电流; X_s 为定子等效漏抗; X_M 为励磁电抗; I_{Rmax} 为 PWM 逆变器并网时的最大电流限制值,一般不超过 DFIG 额定电流的 1.5 倍。

联立 DFIG 定子侧的功率平衡约束方程(2)和转子侧 PWM 逆变器的电流约束关系式(3),以及 $P = (1-s)P_s$ 和 $Q = Q_s$, 可以得到一个关于 DFIG 有功出力 P 和无功出力 Q 的方程式,对应的 P-Q 平面曲线即为 DFIG 的 P-Q 特性曲线,例如额定功率为 800 kW 的某 DFIG 的无功出力极限图如图 2 所示。如已知某分段区间内的预测风速 V_{ti} 时,则根据图 1 所示

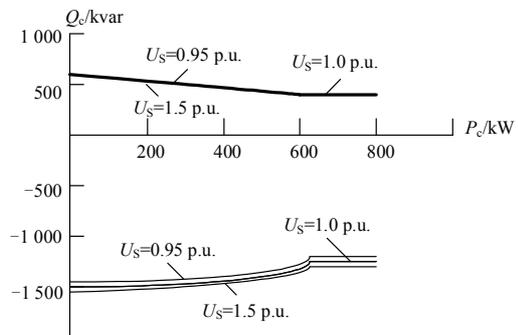


图 2 额定功率为 800 kW 的某 DFIG 的无功出力极限图

Fig. 2 Time limit diagram of DFIG reactive power with P equals 800 kW

U_{DCref} 与实际值 U_{DC} 比较后经 PI 调节器变换成另一个有功电流指令参考信号, 用于实现 SVG 并网点电压和电容器两端电压值的稳定; 电流内环控制是将实际采样的电流反馈值通过同步坐标变换成 dq 轴电流后, 与外环的有功无功电流参考信号进行比较, 通过 PI 调节器变换后, 与三角载波信号进行比较生成 PWM 控制信号, 用于控制 SVG 逆变器的开关管的通断, 直接对电流值进行反馈控制, 实现内环电流的无静差跟踪控制。因而, 控制电路的实质是通过控制调节 SVG 并网点的电压和交流电流的大小和相位差, 来改变 SVG 发出或吸收无功的大小, 从而实现对比并网点无功动态补偿的目的。

3 SVG 的应用

3.1 SVG 在 DFIG 并网时容量的确定

当风速较低时, DFIG 可发出一定范围的无功功率, 随风速的逐渐增大, 当风电机组接近于额定状态时, 为保证其输出的有功功率最大, 需要从并网系统中吸收适当值的感性无功。正常运行时, 电网节点电压闪变和电压频繁波动, 要求在风机并网处加装动态无功补偿装置 SVG。利用 SVG 动态无功补偿首先需要考虑的是并网 DFIG 和 SVG 的容量匹配问题。

由于含有 DFIG 的配电网络的无功优化考虑的是整个系统的稳态性能, 因此有必要对配电系统中的负荷运行状态进行预测划分。这里根据地区日负荷曲线和风速特性, 分成 24 个时间段, 每一时段内负荷取恒定值, 得到对应于平均风速下的 DFIG 的平均有功输出为 P_i 和无功功率 Q_i , 同时得到了理论上双馈式风力发电机接入节点处的电压, 并以此作为该时段内的参考量 U_{PCCref} 。但是, 在每一分段区间内, DFIG 的有功出力 and 无功出力仍然是随机变化的, 针对这种情况, 通过加装一定容量的 SVG 动态跟踪风力机并网点节点电压的参考值 U_{PCCref} , 这样在潮流分析时, 在每一分段内, 风力机可作为 PV 节点处理, 但与一般的 PV 节点不同的是, 由于双馈风力发电机的有功出力的随机性变化, DFIG 的有功功率 P 不是定值, 在潮流分析和无功优化时, 要考虑 DFIG 的有功功率受限于其该分段内有功上限值 P_{imax} 和下限值 P_{imin} 之间, 即满足约束条件 $P_{imin} < P_i < P_{imax}$ 。

风速预测存在一定程度的误差以及分段区间的不同使得 SVG 应受其最小容量的限制。如图 6 所示为 DFIG 的有功出力随时间变化的曲线, 在每一分段区间内, DFIG 的平均有功输出为 P_i , 有功输出的上限值和下限值分别为 P_{imax} 、 P_{imin} , 由 1.2 节的分析, 可以得到此时 SVG 对应于有功输出上限值 P_{imax} 的最大无功极限值和最小无功极限值, 对应于 P_{imin} 最大无功

极限值和最小无功极限值。由于 SVG 可以实现感性无功功率和容性无功功率双向补偿, 因此, 这里取无功输出的最大极限值和最小极限值二者的绝对值中的较大值, 从而得到对应于 P_{imax} 、 P_{imin} 的 DFIG 的无功输出绝对值的极限值分别为 Q_{i1max} 和 Q_{i2max} 。由于在此分段区间内, 维持 DFIG 并网处的节点电压稳定在平均预测值 P_i 附近时, DFIG 需要向其并网节点处补偿的平均无功功率为 Q_i , 故需要 SVG 动态补偿的无功功率的最小值为 $Q_{gi} = \max\{Q_i - Q_{i1max}, Q_i - Q_{i2max}\}$, 考虑所有分段区间后, 得到所需 SVG 的最小容量为 $Q_g = \max\{Q_{g1}, \dots, Q_{gn}, n \text{ 为总的分段数}\}$ 。

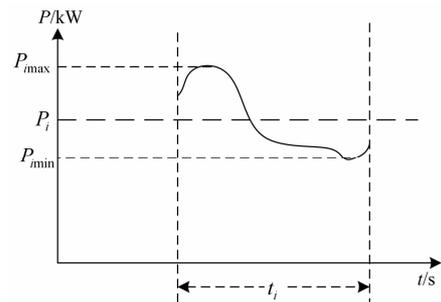


图 6 DFIG 的有功出力随时间变化曲线

Fig. 6 Active power output of DFIG changing with time

图 6 中, t_i 表示第 i 个分段区间, 纵坐标 P 为双馈式风力发电机的有功出力值。

考虑到经济性, 当配电网中无功不足时, 不可能完全由 SVG 来补偿, 因此, 这里 SVG 仅用于稳定 DFIG 并网带来的随机波动问题。

3.2 SVG 参数的确定

SVG 主要的参数包括逆变器交流侧与配电网之间串接的等效电抗值和逆变器直流侧的用于储能的并联电容值。逆变器交流侧所串接的电抗值的大小与相应的电流的动静态性能关系密切, 对 SVG 的容量影响很大, 在 SVG 并网时主要起到两个方面的作用: 一是连接 SVG 的主电路和欲补偿的配电系统, 并向其传输无功功率; 二是串联电感能够滤除高次谐波, 使 SVG 输出的无功功率能够更加平滑的调节, 防止因冲击电流而发生故障。SVG 的并联电容值选择较大时, SVG 逆变器交流侧并网点的电压波动比较小, 但动态响应慢且成本较高; 并联电容选择较小时, 动态响应速度快, 但并网点电压波动较大。因此应合理地选择 SVG 交流侧串联电抗值和直流侧并联电容值的大小, 以下通过实例数据说明 SVG 主要参数的确定方法。

3.2.1 电感值的确定

根据 3.1 节的最小容量法确定 SVG 的无功额定容

量值 Q_{gN} , 取 SVG 并网点逆变器交流侧线电压的额定值为 U , 电网频率为 f 。由第 2 节 SVG 的原理结构模型可知, 正常运行时, SVG 逆变器的交流侧可等效为一个幅值和相位可调的交流电源, 并通过串联电抗器向配电网传递一定的无功功率, 而 SVG 的容量值是指 SVG 可发出或吸收无功的最大值, 因此, 当该等效交流源的电压为零时, SVG 所能够提供的无功功率值即为 SVG 的容量值, 即 SVG 交流侧的等效电抗值 $Z = U^2 / Q_{gN}$ 。

由于实际中串联的电抗值为静止无功发生器 SVG 交流侧等效电抗理论值的 10%~20%, 一般取 10%, 故 SVG 交流侧的等效电抗值 $Z = 0.1U^2 / Q_{gN}$, 从而得到交流侧串联的电感值 $L = Z / \omega = Z / 2\pi f$, 这里 Z 为整个 SVG 装置的等效阻抗, 包括串联电抗器和逆变器的等效损耗阻抗值, 因此实际中的 L 应该略小。

3.2.2 电容值的确定

SVG 直流侧并联电容值的大小主要受并联电容容量 Q_C 与 SVG 额定容量 Q_{gN} 的比值 K_C , 即 $K_C = Q_C / Q_{gN}$ 影响, 该比值一般在 0~4 之间。SVG 直流侧并联电容的容量可表示为 $Q_C = \omega C U_{dc}^2$, 其中 U_{dc} 为 SVG 输出的无功功率为零时其直流侧的电容电压, U_{dc} 应大于 SVG 交流侧电压的最大值, 即 $U_{dc} > \sqrt{2}U$ 。当确定 SVG 无功额定容量 Q_{gN} 时, 取定 K_C 值后代入计算可得到并联的电容值。

3.2.3 实例说明及其效果

如根据最小容量法确定 SVG 的无功额定容量值为 $Q_{gN} = 1.5$ Mvar, 取 SVG 并网点逆变器交流侧线电压的额定值为 $U = 0.69$ kV, 电网频率为 $f = 50$ Hz, 代入数据得到 $L = 0.1$ mH, 实际中的 L 略小于 0.1 mH, 根据仿真, 取 0.9 L, 即 0.09 mH。取并联电容容量 Q_C 与 SVG 额定容量 Q_{gN} 的比值 $K_C = 0.1$ 时, 计算得到直流侧并联电容 $C = 0.5$ mF, 取 $K_C = 1$ 时, 计算得到直流侧并联电容 $C = 5$ mF。图 7 和图 8 分别为 $K_C = 0.1$ 和 $K_C = 1$ 时 SVG 逆变器直流侧电压的波形。

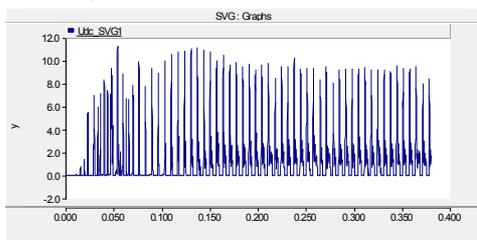


图 7 $K_C = 0.1$ 时 SVG 直流侧电压波形

Fig 7 DC side voltage of SVG waveform when $K_C = 0.1$

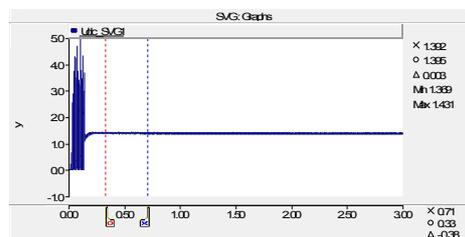


图 8 $K_C = 1$ 时 SVG 直流侧电压波形

Fig 8 DC side voltage of SVG waveform when $K_C = 1$

对比图 7 和图 8 可知, 在电网其他参数确定的情况下, K_C 的选取直接决定了 SVG 直流侧并联电容值的大小, 而当 K_C 取得较小时, 逆变器直流侧的电压波动很大, 将会影响 SVG 的无功补偿效果, 当 K_C 取得较大时, 电容 C 的取值便不经济。因此, 应结合需要补偿的配电网参数和 DFIG 的功率适当选取, 由仿真效果, 这里可取 $K_C = 1$, 即直流侧并联电容值 $C = 5$ mF。

4 基于 SVG 的配电网无功优化的仿真验证

4.1 电压优化验证

以额定功率为 13.5 MW 的 DFIG 并入 IEEE9 节点的配电网为例进行仿真, 并取三个不同风速段进行模拟, 即风速在 0~1 s 内维持在 8 m/s, 在 1~2 s 内维持在 20 m/s, 在 2~3 s 内维持在 25 m/s, 风速变化如图 9 所示。

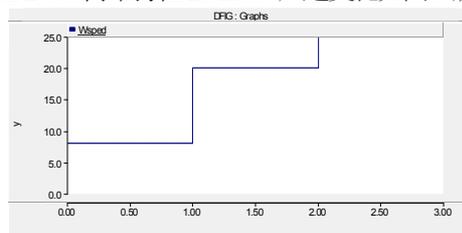


图 9 风速变化模拟曲线

Fig 9 Simulating wind speed curve

此时, DFIG 在对应于三种风速下的最大有功功率分别为 0.6 MW、3.0 MW、3.0 MW, 对应的 DFIG 吸收的无功功率极限值分别约为 0.057 MVA、3.5 MVA、3.5 MVA, 根据 3.2 节得到 SVG 的最小容量值约为 4.56 MVA, 因此选取 SVG 的容量为 5 MVA。根据 3.3 节的分析, 可得到相应的 SVG 的参数取值为 $L = 0.03$ mH, $C = 16.67$ mF。未加入 SVG 时 DFIG 出口电压有效值和无功输出随时间变化的波形分别如图 10 和图 11 所示。

可见, 由于风速和其他不确定因素的影响, DFIG 并网时有以下两个特点: 1) 在风速较大时会吸收一定量的无功; 2) 并网节点电压在每一固定风速条件下波动较小, 在风速发生较大改变时, 波动增大, 随风速继续增大, 可能使电网出现失稳的现象。

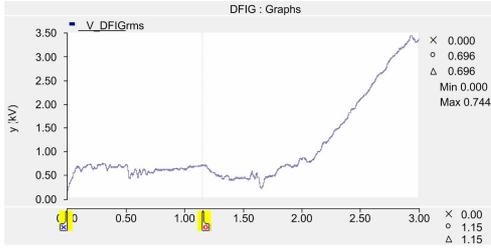


图 10 未加入 SVG 时 DFIG 出口处电压有效值随时间变化的波形
Fig. 10 Voltage RMS of DFIG changing with time without SVG

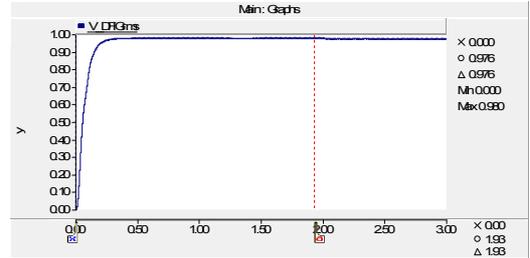


图 12 加入 SVG 后 DFIG 出口处电压有效值随时间变化的波形
Fig. 12 Voltage RMS of DFIG changing with time with SVG

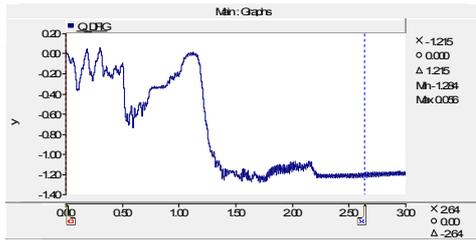


图 11 未加入 SVG 时 DFIG 的无功输出随时间变化的波形
Fig. 11 Curve of reactive power of DFIG changing with time without SVG

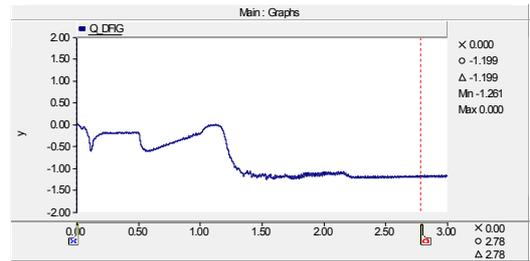


图 13 加入 SVG 后 DFIG 的无功输出随时间变化的波形
Fig. 13 Reactive power of DFIG changing with time with SVG

加入 SVG 后, DFIG 并网节点处电压的有效值和
无功出力随时间变化的曲线分别如图 12 和图 13 所示。

可见, 利用 SVG 动态补偿后, 不仅抬高 DFIG 并
网点的电压使其接近于额定值, 而且能维持电压的稳
定性, 很好地降低甚至消除了 DFIG 并网的波动性。

表 1 优化前后 0.5 s 时系统网损、节点电压以及电压偏移对照表

Table 1 Contrast table of power loss, node voltage and the voltage offset before and after optimization at 0.5 seconds

节 点 数	优化前				网络损耗/ MW	优化后			
	节点电压幅 值标么值	节点电压 相角(°)	节点电压 偏移/%			节点电压幅 值标么值	节点电压 相角(°)	节点电压 偏移/%	网络损耗/ MW
1	1.000	0.000	0		13.262	1.000	0.000	0	12.298
2	1.000	-29.986	0			1.000	-28.890	0	
3	0.967	-27.181	-3.3			1.000	-26.501	0	
4	0.980	-12.125	-2			0.996	-11.890	-0.4	
5	0.974	-20.890	-2.6			1.003	-20.406	0.3	
6	0.955	-27.363	-4.5			1.006	-26.668	0.6	
7	0.907	-31.400	-9.3			1.000	-30.425	0	
8	0.955	-30.023	-4.5			0.996	-28.926	-0.4	
9	0.954	-22.517	-4.6			0.980	-21.845	-2	

表 2 优化前后 1.5 s 时系统网损、节点电压以及电压偏移对照表

Table 2 Contrast table of power loss, node voltage and the voltage offset before and after optimization at 1.5 seconds

节 点 数	优化前				网络损耗/ MW	优化后			
	节点电压幅 值标么值	节点电压 相角(°)	节点电压 偏移/%			节点电压幅 值标么值	节点电压 相角(°)	节点电压 偏移/%	网络损耗/ MW
1	1.000	0.000	0		45.805	1.000	0.000	0	12.298
2	1.000	-59.480	0			1.000	-28.890	0	
3	0.659	-52.166	-34.1			1.000	-26.501	0	
4	0.752	-17.347	-24.8			0.996	-11.890	-0.4	
5	0.582	-34.571	-41.8			1.003	-20.406	0.3	
6	0.639	-52.564	-36.1			1.006	-26.668	0.6	
7	0.654	-61.461	-34.6			1.000	-30.425	0	
8	0.790	-59.525	-21.0			0.996	-28.926	-0.4	
9	0.603	-39.897	-39.7			0.980	-21.845	-2	

4.2 无功输出优化验证

利用 SVG 对 IEEE9 节点的配电网进行无功补
偿优化前后, 在 0.5 s、1.5 s 和 2.5 s 时配电网网损、
节点电压以及电压偏移对照表分别如表 1, 表 2 和表 3
所示, 其中节点电压的偏移用实际电压相对额定电压
的差值与额定电压的比值的百分数表示。

表 3 优化前后 2.5 s 时系统网损、节点电压以及电压偏移对照表

Table 3 Contrast table of power loss, node voltage and the voltage offset before and after optimization at 2.5 seconds

节点数	优化前				优化后			
	节点电压幅值标么值	节点电压相角/(°)	节点电压偏移%	网络损耗/MW	节点电压幅值标么值	节点电压相角/(°)	节点电压偏移%	网络损耗/MW
1	1.000	0.000	0		1.000	0.000	0	
2	1.000	51.126	0		1.000	-28.890	0	
3	2.997	-175.32	199.7		1.000	-26.501	0	
4	2.259	-6.833	125.9		0.996	-11.890	-0.4	
5	0.504	32.322	-49.6	1 882.33	1.003	-20.406	0.3	12.298
6	0.001	25.699	-99.9		1.006	-26.668	0.6	
7	0.094	-174.67	-90.6		1.000	-30.425	0	
8	0.444	51.071	-55.6		0.996	-28.926	-0.4	
9	0.580	140.882	-42.0		0.980	-21.845	-2	

对比表 1, 表 2 和表 3 可知: 由于双馈风力发电机的并入, 未加入 SVG 时, 系统在 3 个典型时刻的电压分布明显不同, 电压偏移量也较大, 电网受风速波动性的影响相当大; 并入 SVG 后, 在不同风速下 DFIG 并网点电压均得到稳定, 系统节点电压偏移量得到降低, 且其效果在风速较大时更加明显; 同时, SVG 的并入在一定程度上降低了网络损耗, 抑制了风速较大时因系统无功需求过多而产生的失稳现象。

5 结论

本文研究了双馈风力发电机并网时的有功无功输出特点及其对配电网的电压无功带来的影响, 考虑其自身无功输出特性, 提出了一种利用 SVG 动态补偿其无功输出波动性以稳定节点电压的无功控制方式, 并对 SVG 并网时的控制结构模型、并网容量以及主要参数的确定进行了详细的分析介绍, 通过 IEEE9 节点的配电系统, 利用 PSCAD 搭建仿真模型, 验证了本文方法的有效性, 为 SVG 在双馈式风力发电系统的电压无功控制中的应用提供了依据。

参考文献

- [1] MOURSIM E, JOOS G, ABBEYC. A secondary voltage control strategy for transmission level interconnection of wind generation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(3): 1178-1190.
- [2] 郎永强, 张学广, 徐殿国, 等. 双馈电机风电场无功功率分析及控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(9): 77-82.
LANG Yongqiang, ZHANG Xueguang, XU Dianguo, et al. Reactive power analysis and control of doubly fed induction generator wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(9): 77-82.
- [3] 陈惠粉, 乔颖, 鲁宗相, 等. 风电场电压协调控制策略研究[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18): 78-83.
CHEN Huifen, QIAO Ying, LU Zongxiang, et al. Study on reactive power and voltage coordinated control strategy of wind farm group[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 78-83.
- [4] 栗然, 张孝乾, 唐凡, 等. 风电场容量比对无功补偿容量的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(4): 20-25.
LI Ran, ZHANG Xiaoqian, TANG Fan, et al. Study on effect of wind farm capacity ratio on the capacity of reactive power compensation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(4): 20-25.
- [5] 贺益康, 周鹏. 变速恒频双馈异步风力发电系统低电压穿越技术综述[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 140-146.
HE Yikang, ZHOU Peng. Overview of the low voltage ride-through technology for variable speed constant frequency doubly fed wind power generation systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 140-146.
- [6] 张洋. 风电场无功补偿容量及其控制方法的研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2005.
ZHANG Yang. Research of the wind farm reactive power compensation capacity and control method[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2005.
- [7] 朱星阳, 张建华, 刘文霞, 等. 风电并网引起电网电压波动的评价方法及应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 89-98.
ZHU Xingyang, ZHANG Jianhua, LIU Wenxia, et al. Evaluation methodology and its application of voltage fluctuation in power network caused by interconnected wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 89-98.
- [8] 张宁宇, 高山, 赵欣, 等. 一种考虑风电随机性的机组

- 组合模型及其算法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 22-29.
ZHANG Ningyu, GAO Shan, ZHAO Xin, et al. An unit commitment model and algorithm with randomness of wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 22-29.
- [9] PAPPALA V S, NAKAWIRO W, ERLICH I. Predictive optimal control of wind farm reactive sources[C] // 2010 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, New Orleans, USA: IEEE, 2010: 1-7.
- [10] 曹娜, 赵海翔, 戴慧珠. 常用风电机组并网运行时的无功与电压分析[J]. 电网技术, 2006, 30(22): 91-94.
CAO Na, ZHAO Haixiang, DAI Huizhu. Analysis on reactive power and voltage of commonly used wind turbines interconnected to power grid[J]. Power System Technology, 2006, 30(22): 91-94.
- [11] 王萌, 施艳艳. 电网电压跌落下双馈风力发电系统强迫励磁控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(19): 32-39.
WANG Meng, SHI Yanyan. Forced excitation control of wind power system with DFIG during grid voltage dips[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(19): 32-39.
- [12] 吕清洁, 王韶, 刘庭磊. 含分布式发电的配电网有功-无功综合优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 71-76.
LÜ Qingjie, WANG Shao, LIU Tinglei. Active/reactive power integrated optimization in distribution networks with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 71-76.
- [13] 张慧玲, 郝思鹏, 袁越, 等. 基于实测数据的双馈风电机组外特性研究及简化建模[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 82-87.
ZHANG Huiling, WANG Shao, LIU Tinglei, et al. Research on external characteristics of DFIG and simplified modeling based on testing data[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 82-87.
- [14] 石一辉. 双馈风电场集中式有功控制系统研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
SHI Yihui. Research of doubly-fed wind farm centralized active power control system[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [15] 迟永宁, 王伟胜, 戴慧珠. 改善基于双馈感应发电机的并网风电场暂态电压稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(25): 25-31.
CHI Yongning, WANG Weisheng, DAI Huizhu. Study on transient voltage stability enhancement of grid-connected wind farm with doubly fed induction generator installations[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(25): 25-31.
- [16] 徐惠勇. 无功功率补偿中 SVG 技术的研究现状与发展[J]. 应用能源技术, 2012(4): 31-33.
XU Huiyong. Reactive power compensation in SVG technology research present situation and the development[J]. Applied Energy Technology, 2012(4): 31-33.
- [17] 刘俊杰. 静止无功发生器(SVG)的研究与设计[D]. 天津: 天津理工大学, 2012.
LIU Junjie. The research and design of static var generator (SVG)[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2012.
- [18] 信珂, 汤伟, 李鹏飞, 等. MSVC 与 SVG 在风电场中的应用比较[J]. 电气技术, 2011(12): 37-39.
XIN Ke, TANG Wei, LI Pengfei, et al. Application and comparison of MSVC and SVG in wind farms[J]. Electrical Engineering, 2011(12): 37-39.
- [19] EI MOURSI M, JOOS G. Optimal tracking secondary voltage control for the DFIG wind turbines and compensator devices[J]. Electric Power Systems Research, 2009, 7(9): 1705-1716.
- [20] 王小艳. 静止无功发生器的电流检测和控制策略研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2010.
WANG Xiaoyan. The research of current detecting and control strategy based on static var generator[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2010.

收稿日期: 2014-02-24; 修回日期: 2014-11-10

作者简介:

付文秀(1989-), 女, 通信作者, 硕士, 主要研究方向为分布式发电和电力系统继电保护; E-mail: fu20070756@126.com

范春菊(1967-), 女, 副教授, 主要从事人工智能在电力系统继电保护中的应用的的教学及科研工作。