

用于大规模集中式风电并网的 VSC-HVDC 频率控制方法

潘 伟¹, 李 勇¹, 曹一家¹, 辛建波²

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 国网江西省电力公司, 江西 南昌 330077)

摘要: 针对大规模集中式风电并网过程中送端系统频率波动以及电能输送损耗严重等问题, 提出一种基于电压源型换流器高压直流输电(VSC-HVDC)的大规模风电并网系统频率稳定控制方法。VSC 送端换流器通过调节脉宽调制(PWM)移相角来控制交流侧电压相位大小, 以达到控制线路有功功率传输的目的, 从而保证风电并网系统有功功率的平衡及系统频率的稳定, 同时通过调节 PWM 调制比来调节交流电压, 使系统电压维持稳定; 受端换流器控制直流侧电压的稳定, 以保证 VSC-HVDC 系统的正常运行。通过在 Power Factory Digsilent 上进行仿真, 验证了该控制策略能显著增强系统的频率稳定性。

关键词: 风电; VSC-HVDC; 频率控制; 直流电压; 稳定性; 并网; 集中式; 高压直流输电; 电压控制

中图分类号: TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.05.015

0 引言

近年来, 大规模风力发电凭借其高度集中开发、发电利用小时数高、占用土地小等突出特点获得快速发展。但由于大规模风电场发电容量大, 特别是海上风电场, 常需通过直流输电技术实现风电的输送与并网。其中, 以基于电压源型换流器高压直流输电(VSC-HVDC)和基于晶闸管的电网换相换流器高压直流输电(LCC-HVDC)为主^[1-2], 而在这 2 种高压直流输电中, VSC-HVDC 凭借其显著特点在大规模海上风电场接入交流电网更胜一筹, 包括相对较小的风电场有功功率载体、滤波器尺寸及较强的黑启动能力, 并且在多端高压直流输电网络中, VSC-HVDC 的一个显著特点是它可以改变直流功率流向但不改变直流电缆的电压极性^[3-7]。但在采用 HVDC 进行风电并网时, 若风电场输出有功功率与 HVDC 传输有功功率不匹配, 将会导致风电场侧有功功率不平衡, 而引起风电并网系统频率波动现象。即便单台风机自身具备一定的频率和电压调节能力, 但若 HVDC 换流器不能将风电场所发电能均衡地输送至电网, 那么风电并网系统频率波动问题将无法得到有效解决, 从而会影响风力发电系统的正常运

行^[8-11]。针对以上问题, 本文提出一种利用 VSC-HVDC 来增强风力发电并网系统送端频率稳定性的方法。

目前, 基于 VSC-HVDC 的大规模风电并网模式中, VSC-HVDC 送端换流器采用的控制方法主要是定交流电压与定有功功率组合控制, 而本文提出的是一种定交流电压与定频率组合控制。这 2 种控制方式都具有一定的无功支撑能力, 有助于维持风电场侧母线电压的稳定。然而, 送端换流器采取定有功功率控制时所取有功功率参考值是由各风电机组有功功率输出参考值的总和来决定, 因此风电机组对有功功率输出必须实时控制, 保证 VSC 送端换流器有功功率控制与风电机组有功功率控制相匹配。而在采取定频率控制时, 风电机组输出多少有功功率, VSC-HVDC 系统就会相应地输送多少有功功率, 这保证了风电并网系统有功功率的平衡, 提高了风电场侧系统的频率稳定性, 同时, 风电机组有功功率输出也不会受到 VSC-HVDC 系统的制约, 机组可以时刻保持最大功率输出, 提高风电利用效率^[12-16]。

本文将首先对风电并网系统频率控制的机理进行分析, 然后对提出的频率控制器数学模型进行推导, 并对控制器参数进行最优选取, 最后通过实例仿真验证本文所提控制方法的有效性。

1 风电并网系统频率控制的机理分析

风电并网系统频率控制的机理如图 1 所示。由 VSC 换流器有功功率传输表达式(1)可得出 VSC 送端有功功率-交流电压相位角关系曲线为 $f_{p\delta}$; 根据本文频率与相位角间数学推导式(14)可近似认为 VSC 送端频率-交流电压相位角关系曲线为 $K_{f\delta}$ 。

由图 1 可知, 曲线 $f_{p\delta}$ 和曲线 $K_{f\delta}$ 的交点 A 为风

收稿日期: 2014-06-27; 修回日期: 2015-03-18

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAA01B01); 国家自然科学基金资助项目(51377001, 61233008); 国网公司重大科技项目(5216A014007V); 湖南省自然科学基金重点资助项目(12JJ2030)

Project supported by the National Science and Technology Support Program of China(2013BAA01B01), the National Natural Science Foundation of China(51377001, 61233008), the Key Project of State Grid S & T Program(5216A014007V) and the Key Project of Hunan Natural Science Foundation of China(12JJ2030)

电并网系统稳定运行点。双馈发电系统输出有功功率增加而引起系统频率变化 Δf 时,VSC 送端换流频率控制器会相应地调节其交流电压相位角的大小,其调节量为 $\Delta\delta_1$,交流侧电压相位会变化到 δ_1 ,此时,换流器有功功率的传输量会相应地增加至 P_1 ,使得 VSC 送端换流器输入输出的有功功率达到平衡,保证风电场输出端频率的稳定。反之,发电系统输出有功功率下降时,换流器有功功率传输量相应减小,保证风电并网系统有功功率的平衡。

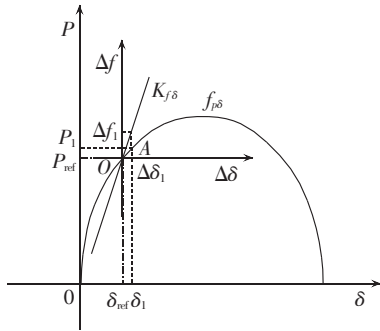


图 1 大规模风电并网系统频率控制机理

Fig.1 Schematic diagram of frequency control for large-scale grid-connected wind farm

2 频率和电压控制器结构及其数学模型

2.1 频率和电压控制器结构

图 2 所示为 VSC 送端换流器频率控制器结构,其中 f_{ref} 为风电系统的参考频率; f_{meas} 为实测频率;频率偏差 Δf 通过控制器后获得 VSC 送端换流器相应的参考移相角,以确定换流器有功功率输送量。该换流器频率控制最主要的任务是把风电场所发电能均衡地输送至电网,以保证发电系统频率波动维持在可接受的范围内。交流电压控制器的结构与频率控制器基本一致,在此不再进行阐述。

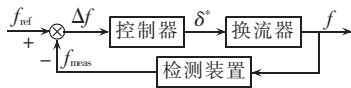


图 2 频率控制结构

Fig.2 Structure of frequency control

2.2 频率和电压控制器数学模型

图 3 为 VSC 送端系统简化图,该系统主要由双馈发电机组 (DFIG)、变压器、换流电抗器、送端换流器组成。为了简化该系统控制模型,可忽略系统功率损耗,同时,HVDC 直流电容稳压的作用,可假设 VSC 受端系统为直流电压源,其值为常数 U_o 。

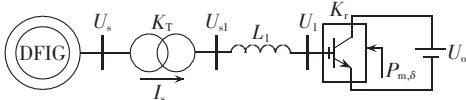


图 3 VSC 送端系统简化图

Fig.3 Simplified diagram of VSC sending-side system

在忽略电阻损耗以及谐波分量的情况下,换流器传输的有功功率可用式(1)来表示:

$$P_s = \frac{U_{s1}U_1}{X_1} \sin \delta \quad (1)$$

其中, U_{s1} 、 U_1 为送端系统交流母线电压; X_1 为换流电抗; δ 为 U_{s1} 超前 U_1 的相位角。

当风电并网系统稳定运行时,定、转子绕组形成的磁场基本保持不变,故定子磁链 $d\psi_s/dt=0$,一般情况下,定子电阻可忽略不计,故定子电压为:

$$U_s \approx \omega_1 \psi_s \quad (2)$$

其中, ω_1 为交流系统角频率,即 $\omega_1 = 2\pi f = 314 \text{ rad/s}$; U_s 为定子电压幅值。风力发电系统的频率和电压大小是由 DFIG 的控制特性和 VSC-HVDC 的运行特性来决定的^[17]。

根据基尔霍夫定律,将 VSC-HVDC 送端系统在 abc 三相静止坐标系下的暂态数学模型进行 dq 变换后获得的暂态数学模型为:

$$\begin{cases} u_{d1} = u_{sd1} - L_1 \frac{di_{sd}}{dt} + \omega_1 L_1 i_{sq} \\ u_{q1} = u_{sq1} - L_1 \frac{di_{sq}}{dt} - \omega_1 L_1 i_{sd} \end{cases} \quad (3)$$

其中, i_{sd} 、 i_{sq} 分别为交流电流 i_s 的 d 、 q 轴分量; u_{sd1} 、 u_{sq1} 和 u_{d1} 、 u_{q1} 分别为交流电压 u_{s1} 和 u_1 的 d 、 q 轴分量。

在稳定运行状态下,各状态变量的导数都为零,即 $di_{sd}/dt=0$ 和 $di_{sq}/dt=0$ 。同时,当同步旋转坐标系 d 轴定向于定子电压矢量 U_s 时,双馈发电机输出端交流电压 u_s 的 d 、 q 轴分量为:

$$\begin{cases} u_{sd} = U_s \approx \omega_1 L_0 i_{sm} \\ u_{sq} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中, L_0 、 i_{sm} 分别为励磁电感和励磁电流。则交流电压 u_{s1} 的 d 、 q 轴分量为:

$$\begin{cases} u_{sd1} = U_{s1} \approx K_T \omega_1 L_0 i_{sm} \\ u_{sq1} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中, K_T 为变压器匝数比。将式(5)代入式(4)可得:

$$\begin{cases} u_{d1} = K_T \omega_1 L_0 i_{sm} + \omega_1 L_1 i_{sq} \\ u_{q1} = -\omega_1 L_1 i_{sd} \end{cases} \quad (6)$$

故送端换流器交流侧电压为:

$$U_1 = \sqrt{(K_T \omega_1 L_0 i_{sm} + \omega_1 L_1 i_{sq})^2 + (\omega_1 L_1 i_{sd})^2} \quad (7)$$

根据脉冲宽度调制 (PWM) 原理可知,换流器交流侧电压与交流侧电压之间的关系式为:

$$U_o = K_r P_m U_1 \Leftrightarrow U_1 = \frac{U_o}{K_r P_m} \quad (8)$$

其中, U_o 为换流器直流电压幅值; K_r 为采取不同 PWM 触发方式下的直流电压利用率; P_m 为 PWM 调制比。

在 VSC-HVDC 系统稳定运行状态下其直流电压 U_o 为一常量,根据式(8)可以推导出交流侧电压 U_1 与调制比 P_m 之间的微分方程式,即:

$$\frac{\partial U_1}{\partial P_m} = -\frac{U_o}{K_r P_m^2} \quad (9)$$

由此可以得出交流侧电压 U_1 与调制比 P_m 之间的传递函数关系式:

$$W_o(s) = \frac{U_1(s)}{P_m(s)} = -\frac{U_o}{K_r P_m^2} \quad (10)$$

在 dq 旋转坐标系下,假设坐标 d 轴与三相电压矢量 U_s 的方向完全一致,则双馈发电系统输出有功功率为:

$$P = \frac{3}{2} u_{sd} i_d \quad (11)$$

其中, u_{sd} 为双馈发电系统与 VSC 接口处三相电压的 d 轴分量; i_d 为交流侧三相电流的 d 轴分量。

忽略变压器及线路电阻损耗,则发电机输出有功功率与线路电抗上传输有功功率相等,根据式(1)和式(11)可得:

$$-\frac{U_{s1} U_1}{X_1} \sin \delta = \frac{3}{2} U_{s1} i_{sd} \quad (12)$$

根据式(7)和式(12)可以得出角频率 ω_1 与 PWM 移相角 δ 之间的关系式:

$$(K_T \omega_1 L_0 i_{sm} + \omega_1 L_1 i_{sq})^2 + (\omega_1 L_1 i_{sd})^2 - \left(\frac{3X_1 i_{sd}}{2 \sin \delta} \right)^2 = 0 \quad (13)$$

考虑到系统保持在稳定运行状态下,可假定电流 i_{sd} 、 i_{sq} 、 i_{sm} 由其指令值 i_{sd}^* 、 i_{sq}^* 、 i_{sm}^* 代替,根据式(13)可以推导出角频率 ω_1 与 PWM 移相角 δ 之间的传递函数关系式,即:

$$W(s) = \frac{\omega_1(s)}{\delta(s)} = \frac{(3X_1 i_{sd}^*)^2 \cos \delta}{4\omega_1 (\sin \delta)^3 [(K_T L_0 i_{sm}^* + L_1 i_{sq}^*)^2 + (L_1 i_{sd}^*)^2]} = \frac{K_d i_{sd}^{*2}}{(K_T L_0 i_{sm}^* + L_1 i_{sq}^*)^2 + (L_1 i_{sd}^*)^2} \quad (14)$$

$$K_d = \frac{(3X_1)^2 \cos \delta}{4\omega_1 (\sin \delta)^3}$$

根据式(10)和式(14)可知,电压与调制比、频率与相角之间近似成比例关系,这为后续控制器参数的选取提供了理论依据。

3 频率和电压控制器的参数选取

由于电压与调制比、频率与相位角之间是线性相关的,因此图 2 中控制器和换流器可以用 2 个比例调节器来代替,其中,参考频率 f_{ref} 取为 1 p.u.,拉氏变换后为 $1/s$,图 4 为复频域下频率控制结构,控制器比例调节参数为 K ,换流器比例调节参数为 K_f 。

根据图 4 可以得出其等值表达式如式(15)所示。

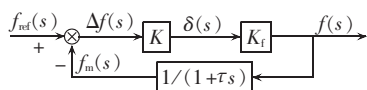


图 4 复频域下频率控制结构
Fig.4 Structure of frequency control
in complex frequency domain

$$f(s) = K K_f \frac{s + \frac{1}{\tau}}{s \left(s + \frac{K K_f + 1}{\tau} \right)} \quad (15)$$

本文后续仿真系统中双馈发电系统输出电压 U_s 、有功功率 P_s 、无功功率 Q_s 分别为 0.69 kV、600 MW、75 Mvar;电感 L_1 为 0.075 H; ω_1 为 314 rad/s;整流器交流侧电压 U_{s1} 、 U_1 都为 416 kV,两电压相位差为 4.7°;换流器直流侧电压为 640 kV;换流器电压利用率 K_r 、调制比 P_m 分别为 1.28、1.2。根据以上参数以及式(15)可计算出 K_d 、 K_f 分别为 7127.89、240.9。对复函数 $f(s)$ 的频率响应特性进行分析,在 K 选不同值时,频率恢复稳定的最短时间 T_s 及其超调量 σ 分布见表 1。

表 1 频率稳定时间及其超调量
Table 1 Frequency stability time and
corresponding overshoot

K	T_s/s	$\sigma/\%$	K	T_s/s	$\sigma/\%$
1.0	0.0782	7.55	0.5	0.0642	13.40
0.9	0.0958	9.33	0.4	0.0702	14.20
0.8	0.0777	8.93	0.3	0.0640	15.10
0.7	0.0753	10.50	0.2	0.0787	16.70
0.6	0.0665	12.70	0.1	0.1000	19.50

图 5 表征了当 K 分别取 0.9、0.7、0.5、0.1 时,闭环控制系统的频率响应曲线(图中频率为标幺值)。以阶跃响应的稳定时间和超调量作为控制参数选取的参考原则,由表 1 可知,当 $K=0.5$ 时,稳定时间与超调量能够取得较好的权衡,因此,本文选取 $K=0.5$ 作为频率控制器的参数。类似地,对于交流电压控制器参数的选取,本文同样采用以上参数选取方法,并得到该控制器参数取值为 0.08。

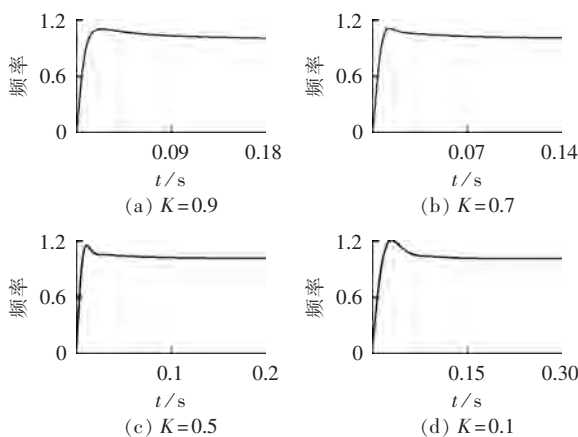


图 5 频率响应曲线

Fig.5 Curves of frequency response

根据图 5 可知,在 $K=0.5$ 时系统频率响应效果最佳,与表 1 结果相一致。

4 仿真与分析

图 6 所示为采用 VSC-HVDC 的大规模风电并

网测试系统。发电系统采用双馈风力发电,通过 VSC-HVDC 进行电能输送并网。其中,双馈发电系统转子侧换流器用于控制转子无功功率和转速;网侧换流器则对变频器直流电压及网侧无功功率进行控制。VSC-HVDC 系统送端换流器主要对双馈发电系统输出端频率和电压进行控制;受端换流器则实现 VSC 直流电压的稳定,保证 VSC-HVDC 系统的正常运行。

本文采用电力系统仿真软件 Power Factory Digsilent,对图 6 所示测试系统进行动态仿真研究,以验证本文提出的 VSC-HVDC 频率稳定控制方法的正确性。所建仿真系统中,风电场由 300 个小型双馈发电机并联组成。VSC-HVDC 系统整流侧变压器 T_1 采用 YNy0 型接线,线电压比为 400 kV/416 kV,额定功率为 1290 MV·A;整流器控制模式采用交流电压与相位控制;直流网络采用双极母线(额定电压 ± 320 kV);逆变器直流侧额定电压为 640 kV,交流侧额定电压为 416 kV,控制模式采用交流电压和无

功率控制;逆变侧变压器 T_2 与 T_1 的类型是一样的,线电压比为 416 kV/400 kV。以下将针对 2 种具体的运行工况开展仿真研究:第一种工况考虑风速随机变化;第二种考虑常见单相接地故障。

4.1 风速随机变化

设定风速在 12 m/s 上下波动,通过仿真可得到系统主要变量的响应曲线。图 7(a)所示为双馈发电机转速响应(标么值)曲线;图 7(b)—(d)所示分别是发电机输出频率(标么值)、有功功率以及节点(中压)电压相位的响应曲线;图 7(e)、(f)所示分别是节点(中压)电压(标么值)和送端换流器调制比的响应曲线。

由图 7(a)—(d)可知,双馈发电系统输出功率随着发电机转速的变化而相应变化,同时,节点(中压)电压相位的变化趋势与发电机输出有功功率相一致,并且系统频率波动很小。由此表明,在发电机转速变化导致输出有功功率增大或减小时,可相应地调节节点(中压)电压相位,保证发电机输出的有

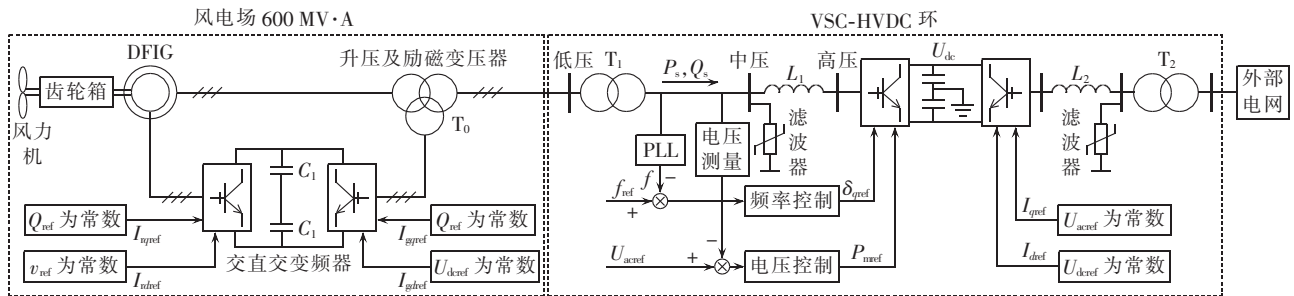


图 6 基于 VSC-HVDC 的大规模风电并网测试系统

Fig.6 Test system of grid-connection system based on VSC-HVDC for large-scale wind farm

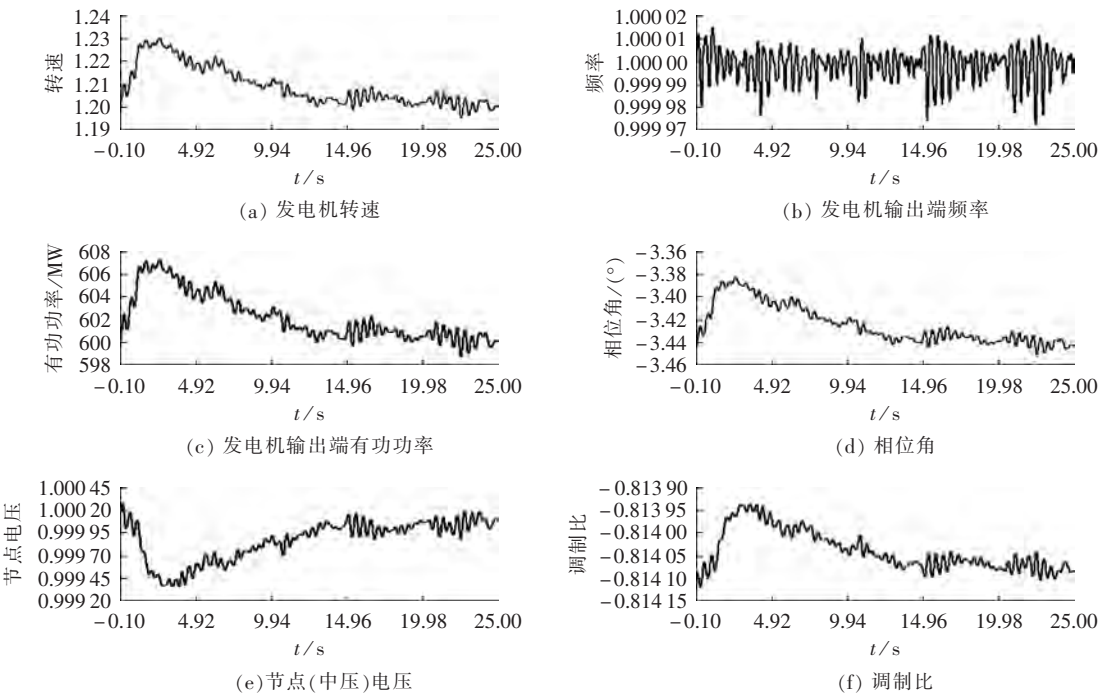


图 7 风速变化时并网系统中各变量响应曲线

Fig.7 Response curve to wind speed change for different variables of grid-connection system

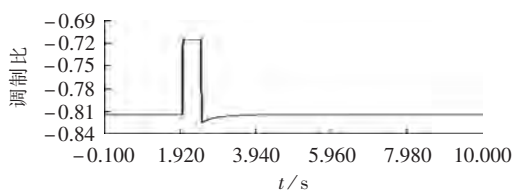
功率与 VSC 传输的有功功率保持同步,使得系统有功功率达到平衡状态,实现系统频率的稳定。根据式(9)可知,在直流电压保持不变的情况下,节点电压与调制比是成反比的,从图 7(e)、(f)可以看出,节点电压和调制比的变化趋势与理论相一致。

4.2 单相接地故障

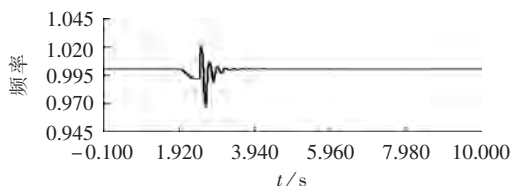
假如系统正常运行 2 s 后节点(低压)处发生 a 相接地故障,故障电阻与电抗分别为 $0.1\ \Omega$ 和 $0.5\ \Omega$,并在故障发生 0.5 s 后切除故障,通过故障分析来验证风电并网系统在发生大扰动时的稳定运行特性。

图 8(a)~(c)所示分别是发电机输出频率(标幺值)、有功功率以及节点(中压)电压相位的响应曲线;图 8(d)、(e)所示分别是节点(中压)电压(标幺值)和送端换流器调制比的响应曲线;图 8(f)、(g)所示分别是频率控制器比例调节参数 K 取 0.7 和 0.9 时发电机输出频率(标幺值)的响应曲线。

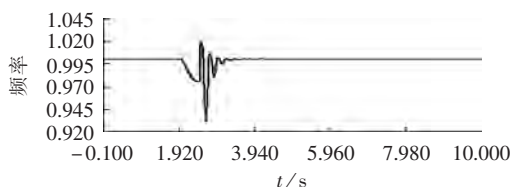
由图 8(a)~(f)可知,系统在节点(低压)处发生单相接地故障时,发电机输出有功功率和节点(中压)电压突然剧降,基本接近于零,故障切除后发电机有功功率和节点电压快速恢复到稳定状态,在此过程中,由于输送至 VSC 的有功功率非常少,故送端换流器快速下调相位角,使得换流器输入输出的有功功率保持平衡,从图 8(a)可知,系统在故障切除



(e) 调制比



(f) 输出端频率($K=0.7$)



(g) 输出端频率($K=0.9$)

图 8 考虑接地故障时并网系统中各变量响应曲线

Fig.8 Response curve to grounding fault for different variables of grid-connection system

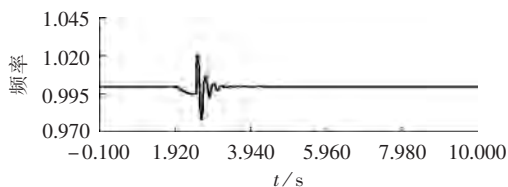
时,虽然频率有所波动,但波动不是特别大,并且系统很快就恢复到稳定运行状态。根据图 8(a)、(f)、(g)可以看出,本文在改变频率控制器的比例调节参数 K 时,系统频率的响应曲线明显不同,当 $K=0.5$ 时,频率控制器的调节效果最佳,与第 3 节选取的最优参数相一致。

5 结论

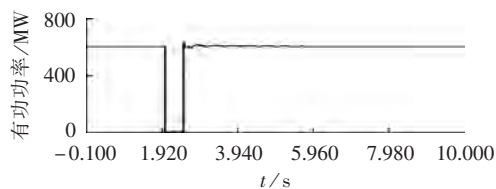
本文通过对风电并网系统数学模型的推导与拓展,得出了频率控制器和电压控制器两者的开环传递函数,为风电并网控制系统模型的建立及其控制器参数的选取提供了理论依据;通过对风电并网系统进行仿真分析,发现系统在风速随机变化时频率波动极小,即使在发生短路故障的情况下,系统频率仍能保持良好状态,由此表明本文所提频率控制方法可以极大提高风力发电系统的频率稳定性;该控制策略也可以应用于其他领域,如其他类型的大规模新能源发电经过 VSC-HVDC 进行并网控制,或多端柔性直流输电系统。

参考文献:

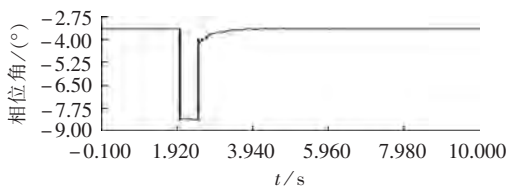
- [1] 朱晓东,周克亮,程明,等. 大规模近海风电场 VSC-HVDC 并网拓扑及其控制[J]. 电网技术,2009,33(18):17-24.
ZHU Xiaodong,ZHOU Keliang,CHENG Ming,et al. Topologies and control of VSC-HVDC systems for grid connection of large-scale off-shore wind farms[J]. Power System Technology,2009,33(18):17-24.
- [2] LI R,BOZHKO S,ASHER G. Frequency control design for offshore



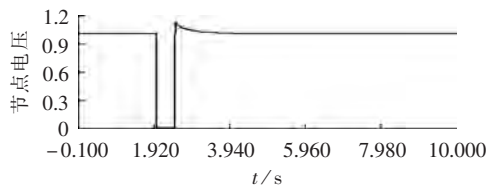
(a) 输出端频率($K=0.5$)



(b) 发电机输出端有功功率



(c) 相位角



(d) 节点(中压)电压

- wind farm grid with LCC-HVDC link connection[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2008,23(3):1085-1092.
- [3] 徐政,陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高电压技术,2007,33(1):1-10.
- XU Zheng,CHEN Hairong. Review and applications of VSC HVDC[J]. High Voltage Engineering,2007,33(1):1-10.
- [4] TEMESGEN M,HAILESELAASSIE K. Primary frequency control of remote grids connected by multi-terminal HVDC[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. Minneapolis,USA: IEEE,2010:1-6.
- [5] DURRANT M,WERNER H,ABBOTT K. Synthesis of multi-objective controllers for a VSC-HVDC terminal using LMIs[C]//CDC 43rd IEEE Conference on Decision and Control. Nassau,Bahamas: IEEE,2004:4473-4478.
- [6] ABDEL-KHALIK A S,MASSOUD A M,ELSEROUGI A A,et al. Optimum power transmission-based droop control design for multi-terminal HVDC of offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(3):3401-3409.
- [7] LIU Yan,CHEN Zhe. Power control method on VSC-HVDC in a hybrid multi-infeed HVDC system[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego,USA:IEEE,2012:1-8.
- [8] HANSEN A D,JAUCH C,SØRENSEN P E,et al. Dynamic wind turbine models in power system simulation tool DigSILENT[M]. Kongens Lyngby,Denmark:Technical University of Denmark,2004: 1-80.
- [9] SILVA B, MOREIRA C L,SECA L,et al. Provision of inertial and primary frequency control services using offshore multiterminal HVDC networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012,3(4):800-808.
- [10] 曹军,王虹富,邱家驹. 变速恒频双馈风电机组频率控制策略[J]. 电力系统自动化,2009,33(13):78-82.
- CAO Jun,WANG Hongfu,QIU Jiaju. Frequency control strategy of variable speed constant frequency doubly-fed induction generator wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009,33(13):78-82.
- [11] DERDOWSKI A. Wind Turbine optimised for VSC-DC transmission [D]. Kongens Lyngby,Denmark:Technical University of Denmark, 2008.
- [12] HAILESELAASSIE T M,MOLINAS M,UNDELAND T. Multi-terminal VSC-HVDC system for integration of offshore wind farms and green electrification of platforms in the North Sea [C]//Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics. Espoo,Finland:IEEE,2008:1-8.
- [13] KANG Jinliang,LIANG Haifeng. Research on grid connection of wind farm based on VSC-HVDC[C]//International Conference on Power System Technology. Hangzhou,China:IEEE,2010:1-6.
- [14] DAI J,PHULPIN Y,SARLETTE A,et al. Coordinated primary frequency control among non-synchronous systems connected by a multi-terminal high-voltage direct current grid[J]. IET Journals & Magazines,2012,6(2):99-108.
- [15] MIAO Zhixin,FAN Lingling,OSBORN D,et al. Wind farms with HVDC delivery in inertial response and primary frequency control[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2010,25 (4):1171-1178.
- [16] XIANG D,RAN L,BUMBY J R,et al. Coordinated control of an HVDC link and doubly fed induction generator in a large offshore wind farm[J]. IEEE Trans on Power Delivery,2008, 21(1):463-471.

作者简介:



潘 伟

潘 伟(1988—),男,湖南长沙人,硕士研究生,主要研究方向为 VSC-HVDC 的建模与应用(E-mail:star178231@163.com);

李 勇(1982—),男,河南信阳人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统优化与控制、电能质量分析与控制(E-mail:yongli@hnu.edu.cn);

曹一家(1969—),男,湖南益阳人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统优化与控制、智能控制系统与决策(E-mail:yjcao@hnu.edu.cn)

辛建波(1970—),男,江西万载人,总工程师,博士,主要研究方向为低碳电力、电能质量。

Frequency control of grid-connection system based on VSC-HVDC for large-scale centralized wind farm

PAN Wei¹, LI Yong¹, CAO Yijia¹, XIN Jianbo²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. State Grid Jiangxi Electric Power Corporation, Nanchang 330077, China)

Abstract: Aiming at the frequency fluctuation of sending-side system and serious power transmission loss during the grid-connection of large-scale centralized wind farm, a method of frequency stability control based on VSC-HVDC is proposed. The sending-side converter of VSC regulates the phase-shifting angle of PWM to control the AC-side voltage phase and the active power of transmission line, which ensures the active power balance and frequency stability of the grid-connected wind power generation system. The AC voltage is adjusted by the PWM modulation ratio to maintain the voltage stability of system. The stability of DC voltage is controlled by the receiving-side converter to ensure the normal operation of VSC-HVDC system. Simulation is carried out on Power Factory Digsilent, which verifies that the proposed control strategy can greatly enhance the frequency stability of system.

Key words: wind power; VSC-HVDC; frequency control; DC voltage; stability; grid-connection; centralized; HVDC power transmission; voltage control