



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 109861265 B

(45) 授权公告日 2022. 05. 03

(21) 申请号 201811618403.7

H02J 3/38 (2006.01)

(22) 申请日 2018.12.28

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 109861265 A

US 2015260159 A1, 2015.09.17

CN 105041569 A, 2015.11.11

CN 103825293 A, 2014.05.28

(43) 申请公布日 2019.06.07

CN 106099974 A, 2016.11.09

(73) 专利权人 四川大学

CN 106160023 A, 2016.11.23

CN 108832657 A, 2018.11.16

地址 610065 四川省成都市武侯区一环路  
南一段24号

王龙等. 基于VSC-HVDC的双馈风电场并网协  
调控制策略研究.《电气自动化》.2018, (第05  
期),

(72) 发明人 刘天琪 曾雪洋 江琴 王顺亮  
张海川 董语晴

审查员 刘勇

(74) 专利代理机构 成都信博专利代理有限责任  
公司 51200

代理人 王沙沙

(51) Int. Cl.

H02J 3/36 (2006.01)

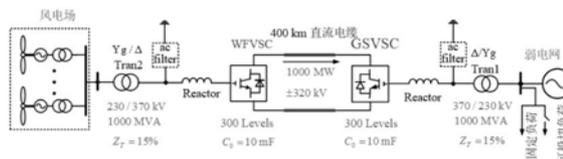
权利要求书3页 说明书11页 附图4页

(54) 发明名称

一种风电场经MMC-HVDC接入弱电网的虚拟  
惯性控制方法

(57) 摘要

本发明公开了一种风电场经MMC-HVDC接入  
弱电网的虚拟惯性控制方法,包括以下步骤:步  
骤1:根据MMC-HVDC输电系统直流侧的等效电容  
和VSC-HVDC输电系统直流电压和弱交流系统的  
频率耦合关系得到MMC-HVDC输电系统的直流电  
压和交流频率的线性耦合关系;步骤2:调整风电  
场的频率;步骤3:调整风机的有功功率输出,即  
可完成控制过程;本发明风电场和MMC-HVDC子模  
块电容存储的静电能量能以类似于同步发电机  
惯性响应的方式提供快速、瞬态的功率支撑,减  
缓频率变化的速率,减小频率的最大偏差点。



1. 一种风电场经MMC-HVDC接入弱电网的虚拟惯性控制方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤1:根据MMC-HVDC输电系统直流侧的等效电容和VSC-HVDC输电系统直流电压和弱交流系统的频率耦合关系得到MMC-HVDC输电系统的直流电压和交流频率的线性耦合关系;

步骤2:根据以下关系式调整风电场的频率:

$$f_{wf}^* = f_{wf\_ref} + K_{wf} V_{dc\_MMC} \frac{dV_{dc\_MMC}}{dt}$$

式中:  $f_{wf}^*$  为风电场新的频率参考值,  $f_{wf\_ref}$  为风电场运行的额定频率,  $K_{wf}$  为常数,  $V_{dc\_MMC}$  为直流电压,  $t$  为时间;

步骤3:根据以下关系式调整风机的有功功率输出,即可完成控制过程;

$$P_{owf}^* = P_{ref} - K_{owf} (f_{wf} - f_{wf\_ref})$$

式中:  $P_{owf}^*$  为风机的有功功率输出,  $P_{ref}$  为风机最大有功功率输出,  $K_{owf}$  为风机的下垂系数,  $f_{wf}$  为风电场的测量频率。

2. 根据权利要求1所述的一种风电场经MMC-HVDC接入弱电网的虚拟惯性控制方法,其特征在于,所述步骤1中VSC-HVDC输电系统直流电压和弱交流系统的频率耦合关系如下:

VSC-HVDC输电系统中同步发电机的转子运动方程为:

$$\frac{2H}{f_0} \cdot \frac{df}{dt} = P_M - P_E = \Delta P_1 (pu) \quad (1)$$

式中:  $H$  为同步发电机的惯性时间常数,  $f_0$  为交流系统运行的额定频率,  $f$  为VSC-HVDC换流站交流侧测的交流系统频率,  $t$  为时间,  $P_M$  为原动机输入的机械功率,  $P_E$  为发电机输出的电磁功率,  $\Delta P_1 (pu)$  为发电机转子转速变化时转子吸收或释放的旋转动能;

VSC-HVDC输电系统直流电容动态方程如下:

$$\frac{C_{eq\_VSC} V_{dc\_VSC}}{S_{VSC}} \cdot \frac{dV_{dc\_VSC}}{dt} = P_{in} - P_{out} = \Delta P_2 (pu) \quad (2)$$

式中:  $C_{eq\_VSC}$  为VSC-HVDC输电系统直流侧等效电容值,  $S_{VSC}$  为VSC-HVDC输电系统换流站的额定容量,  $P_{in}$  为整流站侧输入的有功功率,  $P_{out}$  为逆变侧输出的有功功率,  $\Delta P_2 (pu)$  为在等效电容上存储或释放的动态静电功率,  $V_{dc\_VSC}$  为VSC-HVDC输电系统直流电压;

令  $\Delta P_1 (pu)$  和  $\Delta P_2 (pu)$  相等,直流电压与交流频率之间的关系如下:

$$\frac{2H_{VSC}}{f_0} \cdot \frac{df}{dt} = \frac{C_{eq\_VSC} V_{dc\_VSC}}{S_{VSC}} \cdot \frac{dV_{dc\_VSC}}{dt} \quad (3)$$

式中:  $H_{VSC}$  为VSC-HVDC输电系统换流站的虚拟惯性时间常数;

对式(3)进行积分,得到:

$$\int_{f_0}^f \frac{2H_{VSC}}{f_0} df = \int_{V_{dc0\_VSC}}^{V_{dc\_VSC}} \frac{C_{eq\_VSC} V_{dc\_VSC}}{S_{VSC}} dV_{dc\_VSC} \quad (4)$$

$$\frac{2H_{VSC}}{f_0} (f - f_0) = \frac{C_{eq\_VSC}}{2S_{VSC}} (V_{dc\_VSC}^2 - V_{dc0\_VSC}^2) \quad (5)$$

式中： $V_{dc\_VSC}$ 为VSC-HVDC输电系统测量的直流电压， $V_{dc0\_VSC}$ 为VSC-HVDC输电系统直流电压参考值；

根据式(5)得到VSC-HVDC输电系统的虚拟惯性时间常数 $H_{VSC}$ ：

$$H_{VSC} = \frac{\frac{C_{eq\_VSC} V_{dc0\_VSC}^2}{2S_{VSC}} \left[ \left( \frac{\Delta V_{dc\_VSC}}{V_{dc\_VSC}} + 1 \right)^2 - 1 \right]}{\frac{2\Delta f}{f_0}} = \frac{\frac{C_{eq\_VSC} V_{dc0\_VSC}^2}{2S_{VSC}} \left[ \left( \frac{\Delta V_{dc\_max\_VSC}}{V_{dc\_VSC}} + 1 \right)^2 - 1 \right]}{\frac{2\Delta f_{max}}{f_0}} \quad (6)$$

式中： $\Delta V_{dc\_max\_VSC}$ 为VSC-HVDC输电系统可接受的最大直流电压偏差， $\Delta f_{max}$ 为交流系统可接受的最大频率偏差， $\Delta V_{dc\_VSC}$ 为VSC-HVDC输电系统的直流电压偏差， $\Delta f$ 为交流系统频率偏差；

根据式(5)可以得到VSC-HVDC输电系统定直流电压控制的直流电压参考值 $V_{dc\_VSC}^*$

$$V_{dc\_VSC}^* = \sqrt{\frac{4H_{VSC} S_{VSC}}{f_0 C_{eq\_VSC}} (f - f_0) + V_{dc0\_VSC}^2} \quad (7)$$

3. 根据权利要求2所述的一种风电场经MMC-HVDC接入弱电网的虚拟惯性控制方法，其特征在于，所述MMC-HVDC输电系统直流侧的等效电容为：

$$C_{eq} = \frac{6n}{N_{MMC}} C_{c0} \quad (10)$$

式中： $n$ 为MMC换流站的个数， $N_{MMC}$ 为单桥臂上的子模块个数， $C_{c0}$ 为MMC-HVDC输电系统中每个子模块的电容。

4. 根据权利要求3所述的一种风电场经MMC-HVDC接入弱电网的虚拟惯性控制方法，其特征在于，所述MMC-HVDC输电系统的直流电压和交流频率的线性耦合关系如下：

将式(10)带入式(6)和(7)得到：

$$H_{MMC} = \frac{\frac{3nC_{c0} V_{dc0\_MMC}^2}{N_{MMC} S_{MMC}} \left[ \left( \frac{\Delta V_{dc\_max\_MMC}}{V_{dc\_MMC}} + 1 \right)^2 - 1 \right]}{\frac{2\Delta f_{max}}{f_0}} \quad (11)$$

$$V_{dc\_MMC}^* = \sqrt{\frac{2N_{MMC} H_{MMC} S_{MMC}}{3nf_0 C_{c0}} (f - f_0) + V_{dc0\_MMC}^2} \quad (12)$$

式中： $H_{MMC}$ 为MMC-HVDC输电系统的虚拟惯性时间常数， $V_{dc\_MMC}^*$ 为直流电压参考值， $V_{dc0\_MMC}$ 为MMC-HVDC输电系统直流电压参考值， $\Delta V_{dc\_max\_MMC}$ 为MMC-HVDC输电系统可接受的最大直流电压偏差， $V_{dc\_MMC}$ 为MMC-HVDC输电系统测量的直流电压； $S_{MMC}$ 为MMC-HVDC输电系统换流站的额定容量；

将式(12)用泰勒公式展开，略去二阶及以上高阶项得到：

$$V_{dc\_MMC}^* = V_{dc0\_MMC} + \frac{N_{MMC} H_{MMC} S_{MMC}}{3nf_0 C_{c0} V_{dc0\_MMC}} (f - f_0) \quad (13)$$

引入合适的死区  $\Delta f_d$ 可以得到下式:

$$V_{dc\_MMC}^* = \begin{cases} V_{dc0\_MMC} , & |f - f_0| \leq \Delta f_d \\ V_{dc0\_MMC} + \frac{N_{MMC} H_{MMC} S_{MMC}}{3n f_0 C_{c0} V_{dc0\_MMC}} (f - f_0) , & |f - f_0| > \Delta f_d \end{cases} \quad (14)。$$

## 一种风电场经MMC-HVDC接入弱电网的虚拟惯性控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及电力系统稳定与控制、柔性直流输电、新能源并网技术领域，具体涉及一种风电场经MMC-HVDC接入弱电网的虚拟惯性控制方法。

### 背景技术

[0002] 近年来，大型风电场发展迅速，成为可再生能源和清洁能源领域的热点；由于大型风电场通常远离负荷中心，需要将风能大容量、长距离输送到负荷中心；基于电压源转换器的柔性直流输电系统(VSC-HVDC)被认为是大规模风电场并网与长距离输送的最佳方案(如 X.Liu and A.Lindemann, "Control of VSC-HVDC Connected Offshore Windfarms for Providing Synthetic Inertia," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol.6, no.3, pp.1407-1417, Sept.2018. 和李宇骏, 杨勇, 李颖毅, 等. 提高电力系统惯性水平的风电场和VSC-HVDC协同控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34):6021-6031.); 惯性时间常数是电力系统的一个重要参数, 因为发电机的惯性响应在干扰发生后的最初几秒内起主要作用, 阻碍频率的变化率(the rate of change of frequency, ROCOF), 为一次调频和二次调频的动作争取时间(A. Junyent-Ferr, Y.Pipelzadeh and T.C.Green, "Blending HVDC-Link Energy Storage and Offshore Wind Turbine Inertia for Fast Frequency Response," in IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol.6, no.3, pp.1059-1066, July 2015.); 然而随着可再生能源的渗透和高压直流输电比例的不断增长, 电力系统的惯量不断下降, 导致ROCOF和频率最大偏移点不断增加, 给电网稳定性和控制带来新的难题。

### 发明内容

[0003] 本发明提供一种不需要快速通信和额外的能量存储设施, 风机仅在功率不平衡的初始阶段提供惯性支持, 不会长时间偏离最大功率点跟踪的风电场经基于模块化多电平换流器的柔性直流输电系统MMC-HVDC(modular multilevel converter based high voltage direct current)接入弱电网的虚拟惯性控制方法。

[0004] 本发明采用的技术方案是: 一种风电场经MMC-HVDC接入弱电网的虚拟惯性控制方法, 包括以下步骤:

[0005] 步骤1: 根据MMC-HVDC输电系统直流侧的等效电容和VSC-HVDC输电系统直流电压和弱交流系统的频率耦合关系得到MMC-HVDC输电系统的直流电压和交流频率的线性耦合关系;

[0006] 步骤2: 根据以下关系式调整风电场的频率:

$$[0007] \quad f_{wf}^* = f_{wf\_ref} + K_{wf} V_{dc\_MMC} \frac{dV_{dc\_MMC}}{dt}$$

[0008] 式中:  $f_{wf}^*$  为风电场新的频率参考值,  $f_{wf\_ref}$  为风电场运行的额定频率,  $K_{wf}$  为常数,

$V_{dc\_MMC}$  为直流电压,  $t$  为时间;

[0009] 步骤3: 根据以下关系式调整风机的有功功率输出, 即可完成控制过程;

$$[0010] \quad P_{owf}^* = P_{ref} - K_{owf}(f_{wf} - f_{wf\_ref})$$

[0011] 式中:  $P_{owf}^*$  为风机的有功功率输出,  $P_{ref}$  为风机最大有功功率输出,  $K_{owf}$  为风机的下垂系数,  $f_{wf}$  为风电场的测量频率。

[0012] 进一步的, 所述步骤1中VSC-HVDC输电系统直流电压和弱交流系统的频率耦合关系如下:

[0013] VSC-HVDC输电系统中同步发电机的转子运动方程为:

$$[0014] \quad \frac{2H}{f_0} \cdot \frac{df}{dt} = P_M - P_E = \Delta P_1(pu) \quad (1)$$

[0015] 式中:  $H$  为同步发电机的惯性时间常数,  $f_0$  为交流系统运行的额定频率,  $f$  为VSC-HVDC换流站交流侧测的交流系统频率,  $t$  为时间,  $P_M$  为原动机输入的机械功率,  $P_E$  为发电机输出的电磁功率,  $\Delta P_1(pu)$  为发电机转子转速变化时转子吸收或释放的旋转动能;

[0016] VSC-HVDC输电系统直流电容动态方程如下:

$$[0017] \quad \frac{C_{eq\_VSC} V_{dc\_VSC}}{S_{VSC}} \cdot \frac{dV_{dc\_VSC}}{dt} = P_{in} - P_{out} = \Delta P_2(pu) \quad (2)$$

[0018] 式中:  $C_{eq\_VSC}$  为VSC-HVDC输电系统直流侧等效电容值,  $S_{VSC}$  为VSC-HVDC输电系统换流站的额定容量,  $P_{in}$  为整流站侧输入的有功功率,  $P_{out}$  为逆变侧输出的有功功率,  $\Delta P_2(pu)$  为在等效电容上存储或释放的动态静电功率,  $V_{dc\_VSC}$  为VSC-HVDC输电系统直流电压;

[0019] 令  $\Delta P_1(pu)$  和  $\Delta P_2(pu)$  相等, 直流电压与交流频率之间的关系如下:

$$[0020] \quad \frac{2H_{VSC}}{f_0} \cdot \frac{df}{dt} = \frac{C_{eq\_VSC} V_{dc\_VSC}}{S_{VSC}} \cdot \frac{dV_{dc\_VSC}}{dt} \quad (3)$$

[0021] 式中:  $H_{VSC}$  为VSC-HVDC输电系统换流站的虚拟惯性时间常数;

[0022] 对式(3)进行积分, 得到:

$$[0023] \quad \int_{f_0}^f \frac{2H_{VSC}}{f_0} df = \int_{V_{dc0\_VSC}}^{V_{dc\_VSC}} \frac{C_{eq\_VSC} V_{dc\_VSC}}{S_{VSC}} dV_{dc\_VSC} \quad (4)$$

$$[0024] \quad \frac{2H_{VSC}}{f_0} (f - f_0) = \frac{C_{eq\_VSC}}{2S_{VSC}} (V_{dc\_VSC}^2 - V_{dc0\_VSC}^2) \quad (5)$$

[0025] 式中:  $V_{dc\_VSC}$  为VSC-HVDC输电系统测量的直流电压,  $V_{dc0\_VSC}$  为VSC-HVDC输电系统直流电压参考值;

[0026] 根据式(5)得到VSC-HVDC换流站的虚拟惯性时间常数  $H_{VSC}$ :

$$[0027] \quad H_{VSC} = \frac{\frac{C_{eq\_VSC} V_{dc0\_VSC}^2}{2S_{VSC}} \left[ \left( \frac{\Delta V_{dc\_VSC}}{V_{dc\_VSC}} + 1 \right)^2 - 1 \right]}{\frac{2\Delta f}{f_0}} = \frac{\frac{C_{eq\_VSC} V_{dc0\_VSC}^2}{2S_{VSC}} \left[ \left( \frac{\Delta V_{dc\_max\_VSC}}{V_{dc\_VSC}} + 1 \right)^2 - 1 \right]}{\frac{2\Delta f_{max}}{f_0}} \quad (6)$$

[0028] 式中:  $\Delta V_{dc\_max\_VSC}$  为VSC-HVDC输电系统可接受的最大直流电压偏差,  $\Delta f_{max}$  为交流

系统可接受的最大频率偏差,  $\Delta V_{dc\_VSC}$  为VSC-HVDC输电系统的直流电压偏差,  $\Delta f$  为交流系统频率偏差;

[0029] 式(5)可以写成下式(7):

$$[0030] \quad V_{dc\_VSC}^* = \sqrt{\frac{4H_{VSC}S_{VSC}}{f_0 C_{eq\_VSC}}(f - f_0) + V_{dc0\_VSC}^2} \quad (7)$$

[0031] 式中:  $V_{dc\_VSC}^*$  为VSC-HVDC输电系统直流电压参考值。

[0032] 进一步的,所述MMC-HVDC输电系统直流侧的等效电容为:

$$[0033] \quad C_{eq} = \frac{6n}{N_{MMC}} C_{c0} \quad (10)$$

[0034] 式中:n为MMC换流站的个数,  $N_{MMC}$  为单桥臂上的子模块个数,  $C_{c0}$  为MMC-HVDC输电系统中每个子模块的电容。

[0035] 进一步的,所述MMC-HVDC输电系统的直流电压和交流频率的线性耦合关系如下:

[0036] 将式(10)带入式(6)和(7)得到:

$$[0037] \quad H_{MMC} = \frac{\frac{3nC_{c0}V_{dc0\_MMC}^2}{N_{MMC}S_{MMC}} \left[ \left( \frac{\Delta V_{dc\_max\_MMC}}{V_{dc\_MMC}} + 1 \right)^2 - 1 \right]}{\frac{2\Delta f_{max}}{f_0}} \quad (11)$$

$$[0038] \quad V_{dc\_MMC}^* = \sqrt{\frac{2N_{MMC}H_{MMC}S_{MMC}}{3nf_0C_{c0}}(f - f_0) + V_{dc0\_MMC}^2} \quad (12)$$

[0039] 式中:  $H_{MMC}$  为MMC-HVDC输电系统的的虚拟惯性时间常数,  $V_{dc\_MMC}^*$  为直流电压参考值,  $V_{dc0\_MMC}$  为MMC-HVDC输电系统直流电压参考值,  $\Delta V_{dc\_max\_MMC}$  为MMC-HVDC输电系统可接受的最大直流电压偏差,  $V_{dc\_MMC}$  为MMC-HVDC输电系统测量的直流电压;  $S_{MMC}$  为MMC-HVDC输电系统换流站的额定容量;

[0040] 将式(12)用泰勒公式展开,略去二阶及以上高阶项得到:

$$[0041] \quad V_{dc\_MMC}^* = V_{dc0\_MMC} + \frac{N_{MMC}H_{MMC}S_{MMC}}{3nf_0C_{c0}V_{dc0\_MMC}}(f - f_0) \quad (13)$$

[0042] 引入合适的死区  $\Delta f_d$  可以得到下式:

$$[0043] \quad V_{dc\_MMC}^* = \begin{cases} V_{dc0\_MMC}, & |f - f_0| \leq \Delta f_d \\ V_{dc0\_MMC} + \frac{N_{MMC}H_{MMC}S_{MMC}}{3nf_0C_{c0}V_{dc0\_MMC}}(f - f_0), & |f - f_0| > \Delta f_d \end{cases} \quad (14)。$$

[0044] 本发明的有益效果是:

[0045] (1) 本发明适用于MMC-HVDC输电系统,储存在子模块电容中的静电能量能够快速地为交流系统提供惯性支撑。

[0046] (1) 本发明适用于MMC-HVDC输电系统,风电场能以类似于同步发电机惯性响应的方式提供快速、瞬态的功率支撑,减缓频率变化的速率,减小频率的最大偏差点;

[0047] (2) 本发明通过虚拟电容控制提供远大于MMC-HVDC的直流侧的实际等效电容的虚拟电容不需要快速通信和额外的储能设备,并且风机仅在功率不平衡的初始阶段提供惯性支持,不会长时间偏离最大功率点跟踪(MPPT)控制,故对风机正常运行几乎没有影响。

### 附图说明

[0048] 图1为本发明中风电场经MMC-HVDC接入电网的拓扑结构示意图。

[0049] 图2为本发明控制方法框图。

[0050] 图3为本发明中的等效直流电容功率平衡结构示意图。

[0051] 图4为本发明实施例中负荷投入时本发明控制方法与传统控制方法下弱交流系统频率响应示意图。

[0052] 图5为本发明实施例中负荷投入时本发明控制方法与传统控制方法下直流电压响应示意图。

[0053] 图6为本发明实施例中负荷投入时本发明控制方法与传统控制方法下GSVSC输出的有功功率响应示意图。

[0054] 图7为本发明实施例中负荷投入时本发明控制方法与传统控制方法下风电场有功功率响应示意图。

[0055] 图8为本发明实施例中负荷投入时本发明控制方法与传统控制方法下风电场频率响应示意图。

### 具体实施方式

[0056] 下面结合附图和具体实施例对本发明做进一步说明。

[0057] 本发明针对大型风电场经MMC-HVDC接入弱点网的系统,一种风电场经MMC-HVDC接入弱电网的虚拟惯性控制方法,包括以下步骤:

[0058] 步骤1:根据MMC-HVDC输电系统直流侧的等效电容和VSC-HVDC输电系统直流电压和弱交流系统的频率耦合关系得到MMC-HVDC输电系统的直流电压和交流频率的线性耦合关系;

[0059] 这一步骤提出的是适用于MMC-HVDC输电系统的INEC控制方法,在频率扰动的时候,利用储存在MMC-HVDC子模块电容中的静电能量为弱电网提供惯性支撑。

[0060] 首先建立传统两电平VSC-HVDC输电系统的直流电压和弱交流系统的频率的耦合关系,提出INEC控制策略,让VSC-HVDC中直流电容中储存的静电能量为弱交流系统提供惯性支撑。由于VSC-HVDC与MMC-HVDC直流侧的电容不同,INEC控制方法不能直接用于MMC-HVDC系统;然后需要得到MMC-HVDC直流侧的等效电容的计算关系,提出适用于MMC-HVDC输电系统的INEC控制方法。

[0061] 传统两电平VSC-HVDC输电系统的INEC控制方法

[0062] 该控制方法主要是利用直流电容存储的能量为交流系统提供惯性响应。

[0063] 在交流系统中,同步发电机的功率平衡可以通过频率的变化反映,同步发电机的转子运动方程为:

$$[0064] \quad \frac{2H}{f_0} \cdot \frac{df}{dt} = P_M - P_E = \Delta P_1(pu) \quad (1)$$

[0065] 式中： $H$ 为同步发电机的惯性时间常数， $f_0$ 为交流系统运行的额定频率， $f$ 为VSC-HVDC换流站交流侧测的交流系统频率， $t$ 为时间， $P_M$ 为原动机输入的机械功率， $P_E$ 为发电机输出的电磁功率， $\Delta P_1$  (pu) 为发电机转子转速变化时转子吸收或释放的旋转动能。

[0066] 在直流输电系统中，与交流系统频率 $f$ 相对应的直流电压 $V_{dc\_VSC}$ 能够反映直流侧功率的不平衡；忽略VSC-HVDC的功率损耗，与式(1)类似的VSC-HVDC直流电容动态方程如式(2)所示；当直流电容的电压产生偏差时，直流电容将会充电或者放电，对VSC-HVDC输出的有功功率进行补偿。

[0067] VSC-HVDC输电系统直流电容动态方程如下：

$$[0068] \quad \frac{C_{eq\_VSC} V_{dc\_VSC}}{S_{VSC}} \cdot \frac{dV_{dc\_VSC}}{dt} = P_{in} - P_{out} = \Delta P_2 (pu) \quad (2)$$

[0069] 式中： $C_{eq\_VSC}$ 为VSC-HVDC输电系统直流侧等效电容值， $S_{VSC}$ 为VSC-HVDC输电系统换流站的额定容量， $P_{in}$ 为整流站侧输入的有功功率， $P_{out}$ 为逆变侧输出的有功功率， $\Delta P_2$  (pu) 为在等效电容上存储或释放的动态静电功率， $V_{dc\_VSC}$ 为VSC-HVDC输电系统直流电压，其中pu表示采用的是标么值为单位。

[0070] 令 $\Delta P_1$  (pu) 和 $\Delta P_2$  (pu) 相等，直流电压与交流频率之间的关系如下：

$$[0071] \quad \frac{2H_{VSC}}{f_0} \cdot \frac{df}{dt} = \frac{C_{eq\_VSC} V_{dc\_VSC}}{S_{VSC}} \cdot \frac{dV_{dc\_VSC}}{dt} \quad (3)$$

[0072] 式中： $H_{VSC}$ 为VSC-HVDC输电系统换流站的虚拟惯性时间常数。

[0073] 对式(3)进行积分，得到：

$$[0074] \quad \int_{f_0}^f \frac{2H_{VSC}}{f_0} df = \int_{V_{dc0\_VSC}}^{V_{dc\_VSC}} \frac{C_{eq\_VSC} V_{dc\_VSC}}{S_{VSC}} dV_{dc\_VSC} \quad (4)$$

$$[0075] \quad \frac{2H_{VSC}}{f_0} (f - f_0) = \frac{C_{eq\_VSC}}{2S_{VSC}} (V_{dc\_VSC}^2 - V_{dc0\_VSC}^2) \quad (5)$$

[0076] 式中： $V_{dc\_VSC}$ 为VSC-HVDC输电系统测量的直流电压， $V_{dc0\_VSC}$ 为VSC-HVDC输电系统直流电压参考值。

[0077] 根据式(5)得到VSC-HVDC换流站的虚拟惯性时间常数 $H_{VSC}$ ：

$$[0078] \quad H_{VSC} = \frac{\frac{C_{eq\_VSC} V_{dc0\_VSC}^2}{2S_{VSC}} \left[ \left( \frac{\Delta V_{dc\_VSC}}{V_{dc\_VSC}} + 1 \right)^2 - 1 \right]}{\frac{2\Delta f}{f_0}} = \frac{\frac{C_{eq\_VSC} V_{dc0\_VSC}^2}{2S_{VSC}} \left[ \left( \frac{\Delta V_{dc\_max\_VSC}}{V_{dc\_VSC}} + 1 \right)^2 - 1 \right]}{\frac{2\Delta f_{max}}{f_0}} \quad (6)$$

[0079] 式中： $\Delta V_{dc\_max\_VSC}$ 为VSC-HVDC输电系统可接受的最大直流电压偏差， $\Delta f_{max}$ 为交流系统可接受的最大频率偏差， $\Delta V_{dc\_VSC}$ 为VSC-HVDC输电系统的直流电压偏差， $\Delta f$ 为交流系统频率偏差，本发明中 $\Delta V_{dc\_max\_VSC}$ 取0.1pu，且 $\Delta V_{dc\_max\_VSC} = \Delta V_{dc\_max\_MMC}$ ， $\Delta f_{max}$ 取2Hz。

[0080] 为了让电网侧换流站GSVSC提供惯性，VSC-HVDC的直流电压必须根据交流电网频率变化而变化，式(5)可以写成下式(7)：

$$[0081] \quad V_{dc\_VSC}^* = \sqrt{\frac{4H_{VSC} S_{VSC}}{f_0 C_{eq\_VSC}} (f - f_0) + V_{dc0\_VSC}^2} \quad (7)$$

[0082] 式中： $V_{dc\_VSC}^*$  为VSC-HVDC输电系统直流电压参考值。

[0083] MMC-HVDC等效电容

[0084] 将MMC内部的所有储能电容集总等效为一个电容 $C_{eq}$ ， $C_{eq}$ 承受的电压就是MMC换流器所承受的直流侧电压 $V_{dc\_MMC}$ ，即 $C_{eq}$ 所存储的能量与整个MMC保持一致，其关系式为：

$$[0085] \quad 6nN_{MMC} \left( \frac{1}{2} C_{c0} V_c^2 \right) = \frac{1}{2} C_{eq} V_{dc\_MMC}^2 \quad (8)$$

[0086] 式中： $n$ 为MMC换流站的个数本发明中选取的是点对点MMC-HVDC输电系统， $n$ 取 $n$ ， $N_{MMC}$ 为单桥臂上的子模块个数， $C_{c0}$ 为MMC-HVDC输电系统中每个子模块的电容， $V_c$ 为MMC每个子模块的电容电压。

[0087] 每个子模块承受的电压与直流侧电压存在以下关系：

$$[0088] \quad V_c = \frac{V_{dc\_MMC}}{N_{MMC}} \quad (9)$$

[0089] 由式(8)和式(9)可以得到：

$$[0090] \quad C_{eq} = \frac{6n}{N_{MMC}} C_{c0} \quad (10)$$

[0091] 适用于MMC-HVDC的INEC控制方法

[0092] 即需要得到MMC-HVDC输电系统的直流电压和交流频率的线性耦合关系

[0093] 将MMC的等效电容 $C_{eq}$ 带入式(6)和式(7)，可以得到MMC-HVDC输电系统的虚拟惯性常数 $H_{MMC}$ 和电网侧换流站GSVSC定直流电压控制的直流电压参考值 $V_{dc\_MMC}^*$ 。

$$[0094] \quad H_{MMC} = \frac{3nC_{c0}V_{dc0\_MMC}^2 \left[ \left( \frac{\Delta V_{dc\_max\_MMC}}{V_{dc\_MMC}} + 1 \right)^2 - 1 \right]}{2\Delta f_{max} f_0} \quad (11)$$

$$[0095] \quad V_{dc\_MMC}^* = \sqrt{\frac{2N_{MMC}H_{MMC}S_{MMC}}{3nf_0C_{c0}}(f - f_0) + V_{dc0\_MMC}^2} \quad (12)$$

[0096] 式中： $H_{MMC}$ 为MMC-HVDC输电系统的虚拟惯性时间常数， $V_{dc\_MMC}^*$ 为直流电压参考值， $V_{dc0\_MMC}$ 为MMC-HVDC输电系统直流电压参考值， $\Delta V_{dc\_max\_MMC}$ 为MMC-HVDC输电系统可接受的最大直流电压偏差， $V_{dc\_MMC}$ 为MMC-HVDC输电系统测量的直流电压； $S_{MMC}$ 为MMC-HVDC输电系统换流站的额定容量。

[0097] 由式(12)可知，INEC控制方法是一个非线性控制方法，而电网稳定运行的频率偏差不能超过2%，所以在频率额定运行点，用泰勒公式展开式(12)，并略去二阶及其以上的高阶项，可得：

$$[0098] \quad V_{dc\_MMC}^* = V_{dc0\_MMC} + \frac{N_{MMC}H_{MMC}S_{MMC}}{3nf_0C_{c0}V_{dc0\_MMC}}(f - f_0) \quad (13)$$

[0099] 为了避免直流电压响应小扰动频率，引入合适的死区 $\Delta f_d$ 可以得到线性化MMC-

HVDC输电系统的直流电压和交流频率的线性耦合关系:

$$[0100] \quad V_{dc\_MMC}^* = \begin{cases} V_{dc0\_MMC}, & |f - f_0| \leq \Delta f_d \\ V_{dc0\_MMC} + \frac{N_{MMC} H_{MMC} S_{MMC}}{3n f_0 C_{c0} V_{dc0\_MMC}} (f - f_0), & |f - f_0| > \Delta f_d \end{cases} \quad (14)。$$

[0101] 步骤1的控制过程需要MMC-HVDC子模块电容中储存的静电能量为弱交流系统提供惯性支撑,但是由于正常体积的子模块电容下,INEC控制方法下MMC-HVDC系统提供的惯性支撑有限,需要安装大容量的子模块电容提供所需的惯性支撑,这会导致换流站体积和工程造价的增加;所以提出虚拟电容控制方法,包括风电场侧换流站WFVSC的变频控制和风机的功率-频率下垂控制。

[0102] 风电场侧换流站变频控制中,根据直流电压变化对风电场进行变频控制,人工耦合风电场和电网的频率关系,如步骤2所示。

[0103] 步骤2:WFVSC控制的是风电场的频率和电压幅值,在WFVSC定频率控制中引入变频控制,根据以下关系式调整风电场的频率:

$$[0104] \quad f_{wf}^* = f_{wf\_ref} + K_{wf} V_{dc\_MMC} \frac{dV_{dc\_MMC}}{dt} \quad (15)$$

[0105] 式中: $f_{wf}^*$ 为风电场新的频率参考值, $f_{wf\_ref}$ 为风电场运行的额定频率, $K_{wf}$ 为常数, $V_{dc\_MMC}$ 为直流电压, $t$ 为时间。

[0106] 风电场的频率将会根据直流电压的偏移和变化的斜率进行修正,动态的反映交流电网的频率;允许MMC-HVDC直流电压的偏移不能超过额定值的 $\pm 10\%$ ,风电场的频率应该限制在 $2\%$ ,因为频率偏差过大会影响安装在风电场的对频率敏感的设备 and 负荷的正常运行。

[0107] 步骤3:风机的有功-下垂控制,使得风机有功功率输出能够响应风电场的频率变化;根据以下关系式调整风机的有功功率输出;当风电场频率响应交流系统频率产生偏移时,风机根据下式,调整输出的有功功率:

$$[0108] \quad P_{owf}^* = P_{ref} - K_{owf} (f_{wf} - f_{wf\_ref}) \quad (16)$$

[0109] 式中: $P_{owf}^*$ 为风机考虑了下垂控制之后的有功功率输出, $P_{ref}$ 为风机最大有功功率输出, $K_{owf}$ 为风机的下垂系数, $f_{wf}$ 为风电场的测量频率。

[0110] 虚拟电容控制方法中,实际上是在暂态过程中,在MMC-HVDC直流侧虚拟出一个比实际电容大很多的虚拟电容;风电场能以类似于同步发电机惯性响应的方式提供快速、瞬态的惯性支撑;本质上虚拟电容提供的能量是由风机转子旋转的动能提供的,所以叫虚拟电容控制。

[0111] 虚拟电容控制原理如下:

[0112] 对于图3中等效电容,其电流和电压的关系如下:

$$[0113] \quad C_{eq} \frac{dV_{dc\_MMC}}{dt} = i_i - i_o \quad (17)$$

[0114] 式中: $i_c$ 为流过等效电容的电流, $i_i$ 为风电场侧换流站WFVSC流向等效电容方向的

电流,  $i_o$  为等效电容流向电网侧换流站GSVSC方向的电流。

[0115] 式 (17) 两边同时乘以直流电压  $V_{dc\_MMC}$ , 可以得到MMC-HVDC受到扰动时的电容电压与不平和功率之间的关系:

$$[0116] \quad C_{eq} V_{dc\_MMC} \frac{dV_{dc\_MMC}}{dt} = P_i - P_o \quad (18)$$

[0117] 式中:  $P_i$  为WVSC换流站流向等效直流电容方向的功率,  $P_o$  为等效直流电容流向GSVSC换流站方向的功率。

[0118] 由式 (8) 可知, 等效直流电容值越大, 系统在功率扰动巡检, 电容的变化率  $dV_{dc\_MMC}/dt$  就越小。

[0119] 由式 (16) 和式 (17) 可得单个风机输出的附加功率  $\Delta P_{owf}$  和直流电压  $V_{dc\_MMC}$  之间的关系:

$$[0120] \quad \Delta P_{owf} = -K_{owf} K_{wf} V_{dc\_MMC} \frac{dV_{dc\_MMC}}{dt} \quad (19)$$

[0121] 整个风电场输出的附加功率  $\Delta P$  与直流电压  $V_{dc\_MMC}$  之间的关系:

$$[0122] \quad \Delta P = \sum_{i=1}^{N_w} \Delta P_{owf}^i = -K_{wf} \sum_{i=1}^{N_w} K_{owf}^i V_{dc\_MMC} \frac{dV_{dc\_MMC}}{dt} \quad (20)$$

[0123] 式中:  $N_w$  为装有功率-频率下垂控制的风机数量。

[0124] 当风机和WVSC采用上述控制方法之后, WVSC输出的功率为  $P_i'$ :

$$[0125] \quad P_i' = P_i + \Delta P = P_i - K_{wf} \sum_{i=1}^{N_w} K_{owf}^i V_{dc\_MMC} \frac{dV_{dc\_MMC}}{dt} \quad (21)$$

[0126] 将式 (21) 带入式 (18), 用  $P_i'$  替换式 (18) 中的  $P_i$ , 整理后得:

$$[0127] \quad C_{eq} V_{dc\_MMC} \frac{dV_{dc\_MMC}}{dt} + K_{wf} \sum_{i=1}^{N_w} K_{owf}^i V_{dc\_MMC} \frac{dV_{dc\_MMC}}{dt} = P_i' - P_o \quad (22)$$

[0128] 对式 (22) 两边同时对时间积分得到:

$$[0129] \quad \frac{1}{2} C_{eq} V_{dc\_MMC}^2 + \frac{1}{2} K_{wf} \sum_{i=1}^{N_w} K_{owf}^i V_{dc\_MMC}^2 = W_i - W_o \quad (23)$$

[0130] 式中:  $W_i$  为WVSC换流站流向等效直流电容方向的电能,  $W_o$  为等效直流电容流向GSVSC换流站方向的电能。

[0131] 通过上述分析可知, WVSC和风机采用上述控制方法之后, 相当于系统受扰瞬间, 等值地增大了MMC-HVDC的等值电容, 该电容为虚拟电容  $C_{vir}$ , 大小如下:

$$[0132] \quad C_{vir} = K_{wf} \sum_{i=1}^{N_w} K_{owf}^i \quad (24)$$

[0133] 当风电场中每台风机的有功-频率下垂系数  $K_{owf}$  都取相等时, 式 (23) 可以写成:

$$[0134] \quad C_{vir} = N_w K_{wf} K_{owf} \quad (25)$$

[0135] 因此可以通过调整  $N_w$ 、 $K_{wf}$  和  $K_{owf}$  的值来调整虚拟电容的大小。

[0136] 加入虚拟惯性控制之后, MMC-HVDC等效直流电容为:

$$[0137] \quad C'_{eq} = C_{eq} + C_{vir} = \frac{6n}{N_{MMC}} C_{c0} + N_w K_{wf} K_{ovf} \quad (26)$$

[0138] 根据式(6)和(26),加入虚拟惯性控制后,MMC-HVDC的虚拟惯性常数为:

$$[0139] \quad H'_{MMC} = \frac{\left( \frac{6n}{N_{MMC}} C_{c0} + N_w K_{wf} K_{ovf} \right) \frac{V_{dc0\_MMC}^2}{2S_{MMC}} \left[ \left( \frac{\Delta V_{dc\_max\_MMC}}{V_{dc\_MMC}} + 1 \right)^2 - 1 \right]}{\frac{2\Delta f_{max}}{f_0}} \quad (27)$$

[0140] 对比式(11)和式(27)可知,虚拟电容控制可以显著地增加MMC-HVDC的虚拟惯性时间常数,可以通过调节 $N_w$ 、 $K_{wf}$ 和 $K_{ovf}$ 的值来提供比实际等值电容大很多的虚拟电容和虚拟惯性常数。

[0141] 实施例

[0142] 为验证本发明方法的准确性,在PSCAD/EMTDC中搭建如图1所示,大型风电场经MMC-HVDC接入弱交流电网的输电系统;风电场采用带背靠变换器的永磁同步发电机(the permanent magnet synchronous generator, PMSG)的直驱风机;WFVSC控制交流电压幅值和风电场的频率,负责汇集风电场发出的电能;GSVSC控制直流电压和与弱交流系统交换的无功功率。

[0143] 弱交流电网由固定负荷和可切负荷组成,MMC-HVDC系统的参数如表1所示;同步发电机采用七阶模型,其参数如表2所示;固定负荷为700MW+100Mvar,可切换负荷为35MW+5Mvar,为固定负载的5%;风电场由120台PMSG风机组成,其额定功率为5MW。

[0144] 表1.MMC-HVDC参数

参数	有名值
额定容量 $S_{MMC}$	1000 MVA
额定直流电压 $V_{dc\_MMC}$	640 kV
每个桥臂的子模块数 $N_{MMC}$	300
每个子模块的电容值 $C_{c0}$	10 mF
桥臂电感 $L_0$	50 mH
直流侧电阻	8.52 $\Omega$
最大允许的直流电压偏差	64kV
$\Delta V_{dc\_max\_MMC}$	

[0146] 表2.同步发电机参数

参数	有名值
额定容量 $S_g$	330 MVA
机端电压 $V_g$	13.8 kV
惯性时间常数 $H$	3.114 s
直轴同步电抗 $x_d$ , 直轴暂态电抗 $x'_d$ , 直轴次暂态电抗 $x''_d$	1.305, 0.296, 0.252
交轴同步电抗 $x_q$ , 交轴次暂态电抗 $x'_q$ , 定子漏抗 $x_l$	0.474, 0.243, 0.18
[0147] 直轴开路暂态时间常数 $T'_{d0}$ , 直轴开路次暂态时间常数 $T''_{d0}$ , 交轴开路暂态时间常数 $T'_{q0}$	1.01, 0.053, 0.071
原动机调差系数 $R_p$	0.08
原动机时间常数 $T_W$	2.67 s
伺服电机时间常数	0.07 s
励磁调节增益	400
励磁时间常数	0.01 s

[0148] 由表1和表2的参数和最大允许频率偏差  $\Delta f_{\max}$ , 计算MMC-HVDC模拟惯性时间常数为0.215s; 设置  $K_{wf} = 0.00008$ ,  $K_{owf} = 0.3415$ ; 这样通过本发明所提出的控制方法的模拟惯性时间常数为2s; 10s时刻投入可投切复合, 图4-图8为负荷突然增加时, 无附加控制、采用线性化INEC控制和本发明所体方法对比示意图, 其中G1表示无附加控制后的变化曲线, G2表示只采用步骤1控制后的变化曲线  $H_{VSC} = 0.215s$ , G3表示采用本发明控制后的变化曲线,  $H_{VSC} = 2s$ 。

[0149] 从图中可以看出, 可变负荷突然投入, 无附加控制时, MMC-HVDC直流电压、GSVSC侧有功功率、风电场频率、风电场有功功率都没有变化, 频率下降的速率最大, 频率的最低点也最大; 系统采用线性化INEC控制时, GSVSC可以通过释放存储在MMC-HVDC子模块电容中的静电能量来为弱交流系统提供支撑; 然而由于正常体积的子模块的电容值相对较小, 因此提供的惯性支撑有限, 对频率的改善较小。与仅采用线性化INEC控制方法相比, 虚拟电容控制方法可以使直流电压和频率下降更慢, 因为它使风电场参与弱交流电网的频率调节提供更大的惯性; 从图4、图5和图6可以看出, 虚拟电容控制下的交流系统频率和直流电压和GSVSC注入交流系统的功率与仅采用线性化INEC控制方法波形类似, 且提供的功率支撑更

多;这说明虚拟电容控制方法可以提供比实际等效直流电容大很多的虚拟电容。

[0150] 系统采用虚拟电容控制方法时,弱交流系统的频率下降最慢且频率最低点比另外两种控制方法下的高;表明虚拟电容控制方法可提供更多虚拟惯性支撑,提高弱交流系统的频率稳定。风电场仅在功率不平衡的初始阶段提供惯性支撑,当频率进入新的稳定状态时,风电场的频率恢复至额定值(50Hz),虚拟电容控制不会让风机长时间偏离最大功率点跟踪控制,对风机正常运行几乎没有影响。

[0151] 本发明首先将适用于传统两电平的VSC-HVDC的惯性模拟控制(the inertia emulation control, INEC)方法(J. Zhu, C. D. Booth, G. P. Adam, A. J. Roscoe, and C. G. Bright, "Inertia emulation control strategy for VSC-HVDC transmission systems," IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 2, pp. 1277-1287, May 2013.)的概念扩展并调整到MMC-HVDC系统中,建立了MMC-HVDC直流电压与交流电网频率的耦合关系,让MMC-HVDC子模块电容中储存的静电能量为交流系统提供惯性支撑;但正常容量的子模块电容提供的惯性有限,需要安装大容量的子模块电容器,这会增加工程造价和换流站体积。所以提出了虚拟电容控制,包括风电场侧换流站WFSVC的变频控制和风机的功率-频率下垂控制;在大功率的不平衡功率冲击下,风电场能以类似于同步发电机惯性响应的方式提供快速、瞬态的功率支撑;增加MMC-HVDC的等效电容值,减缓频率变化的速率,减小频率的最大偏差点。在暂态过程中,虚拟电容控制能够提供比实际等效电容大很多的虚拟电容;惯性模拟控制和虚拟电容控制不需要快速通信和额外的能量存储设施,并且风机仅在功率不平衡的初始阶段提供惯性支持,不会长时间偏离最大功率点跟踪控制,对风机正常运行几乎没有影响。

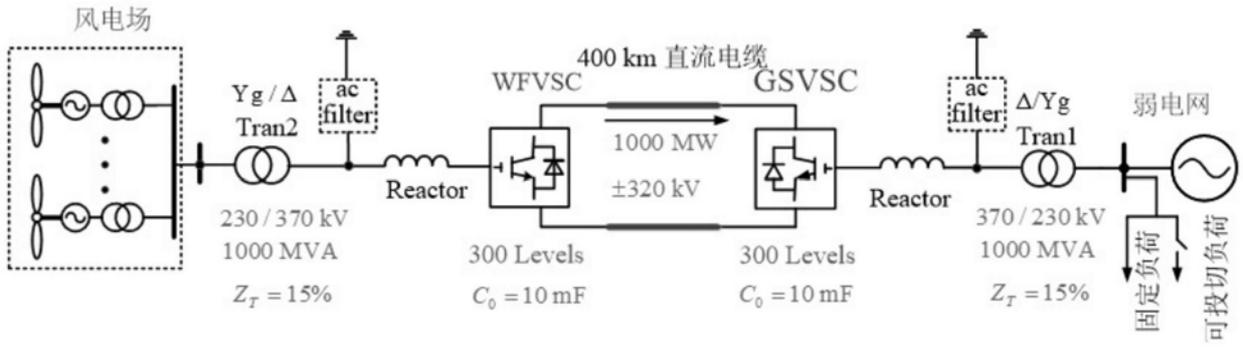


图1

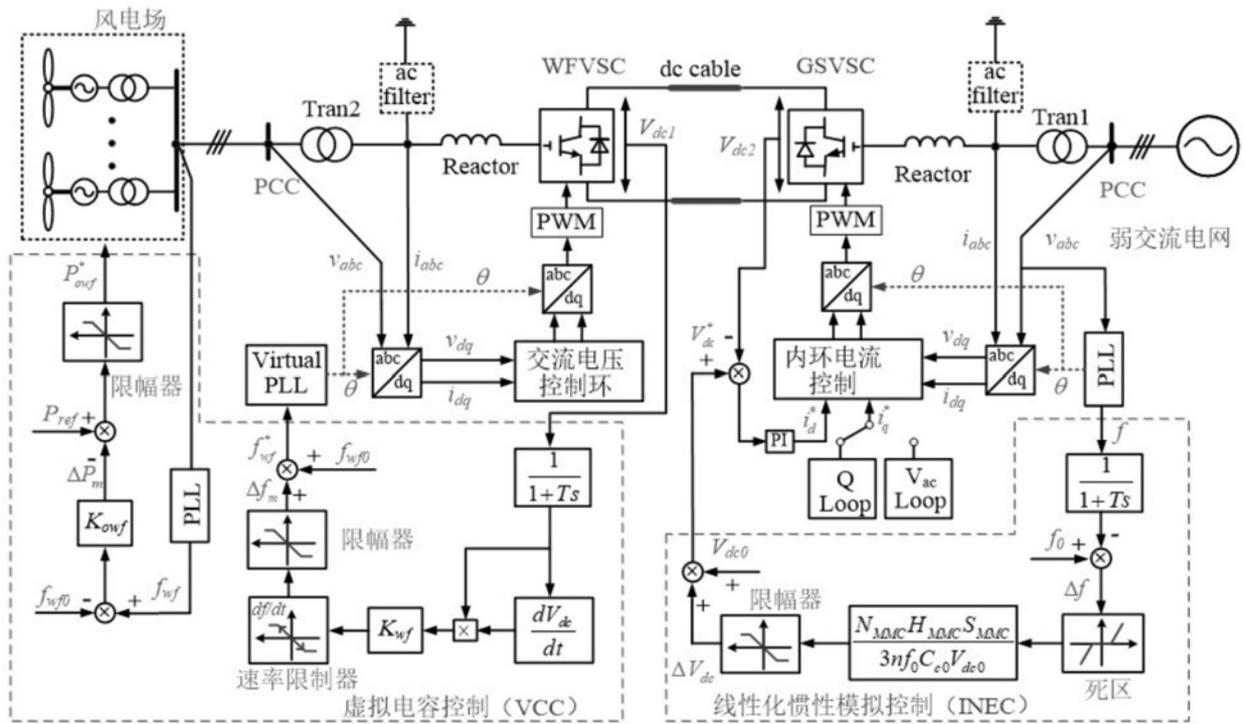


图2

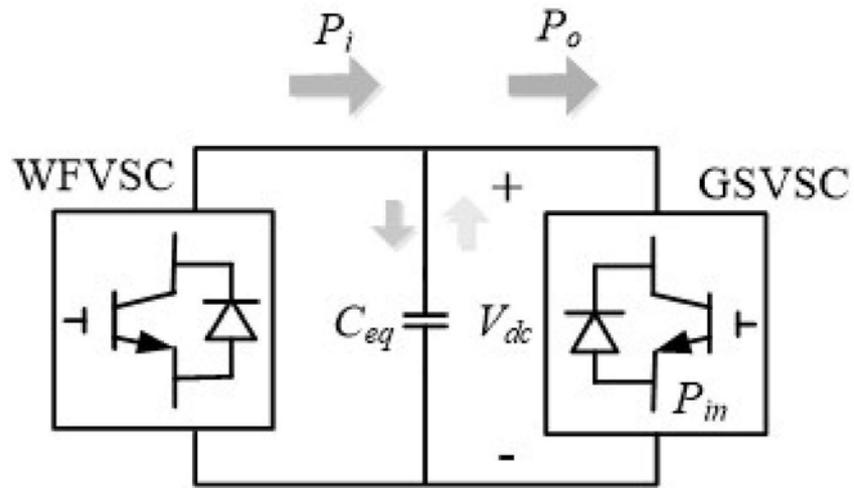


图3

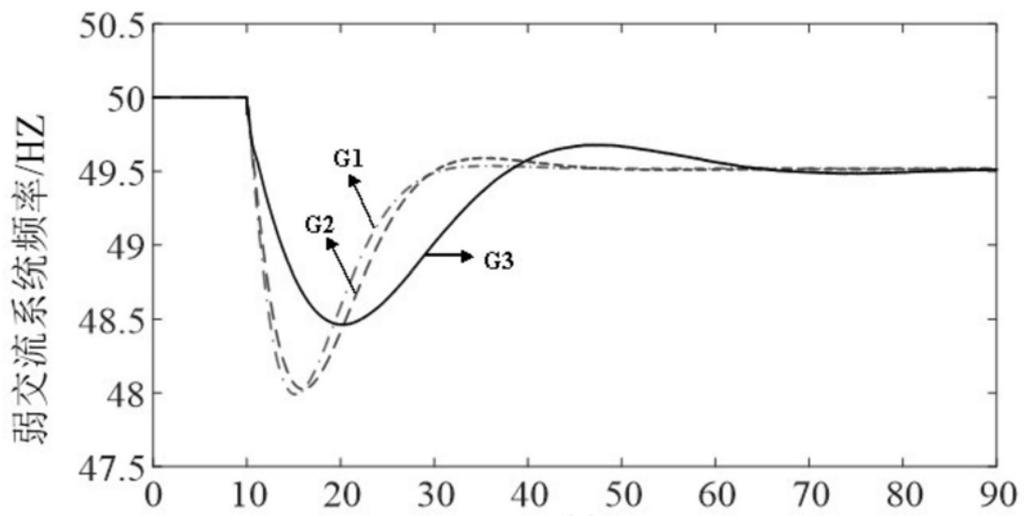


图4

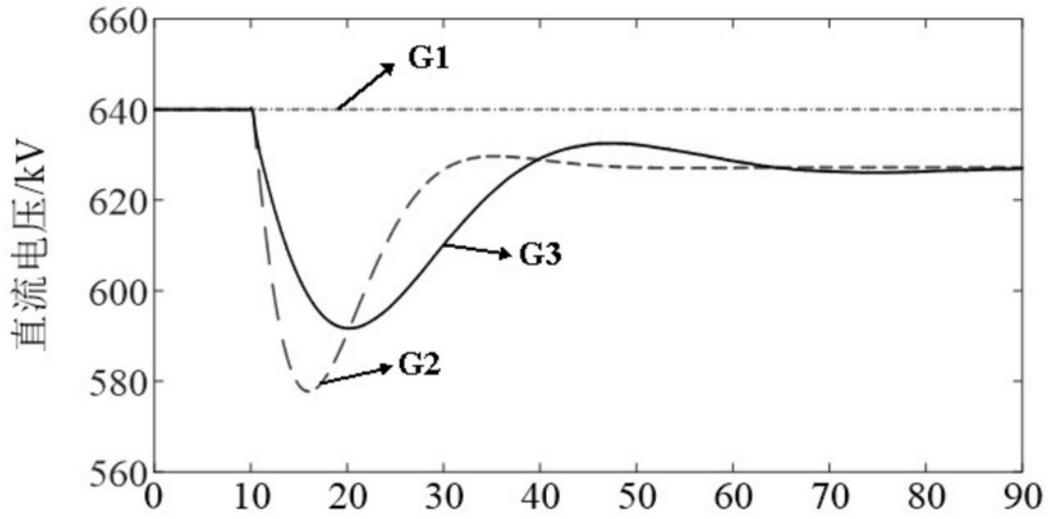


图5

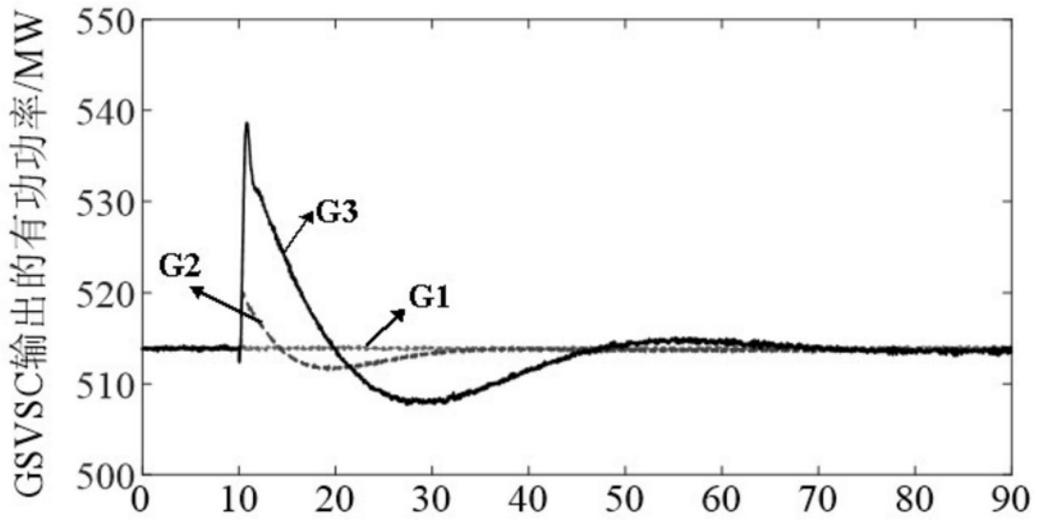


图6

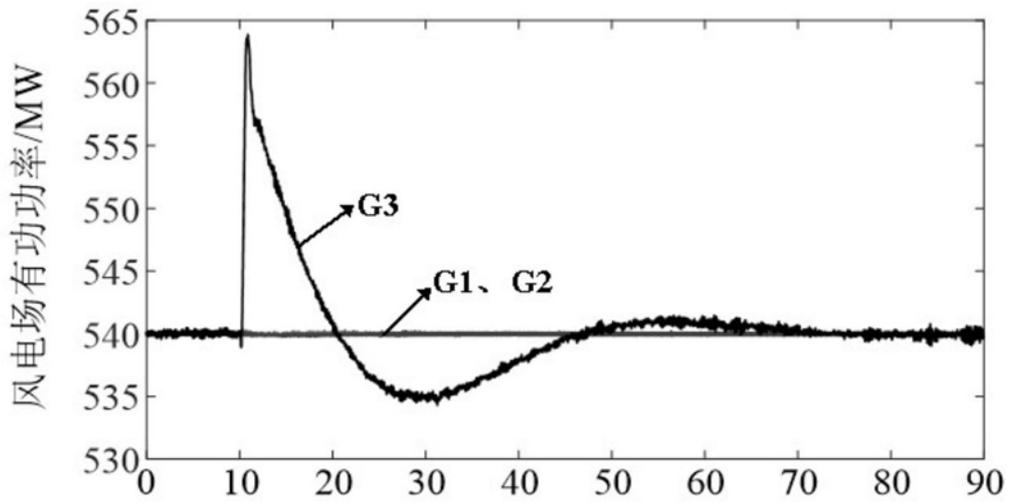


图7

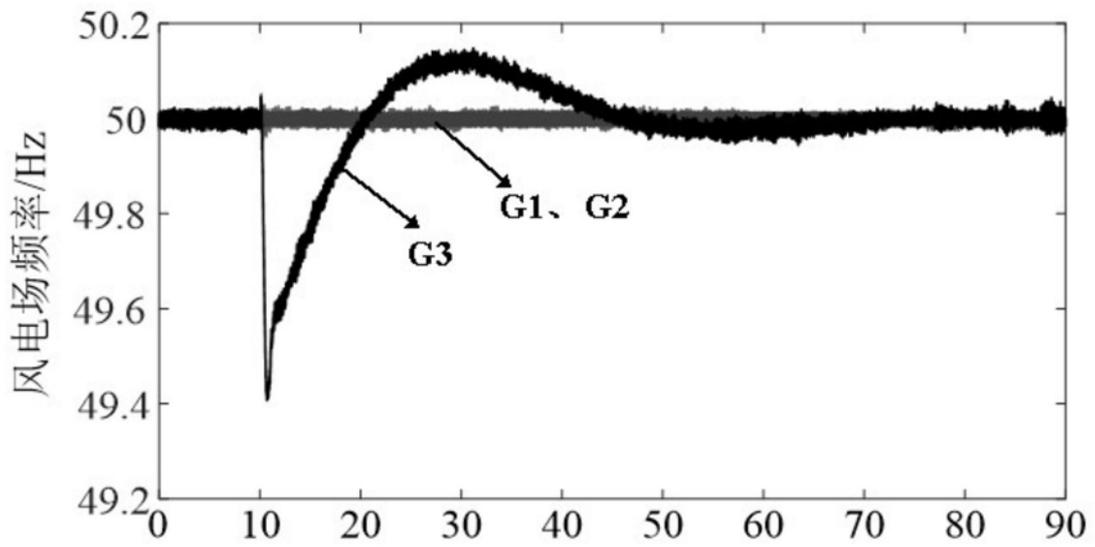


图8