



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112217225 B

(45) 授权公告日 2023.02.28

(21) 申请号 201910623910.8

(22) 申请日 2019.07.11

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 112217225 A

(43) 申请公布日 2021.01.12

(73) 专利权人 华北电力大学(保定)  
地址 071003 河北省保定市永华北大街619  
号华北电力大学一校区

(72) 发明人 朱晓荣 孟欣欣

(51) Int.Cl.  
H02J 3/38 (2006.01)  
H02J 3/32 (2006.01)  
H02J 1/10 (2006.01)  
H02J 1/14 (2006.01)

审查员 曹玮

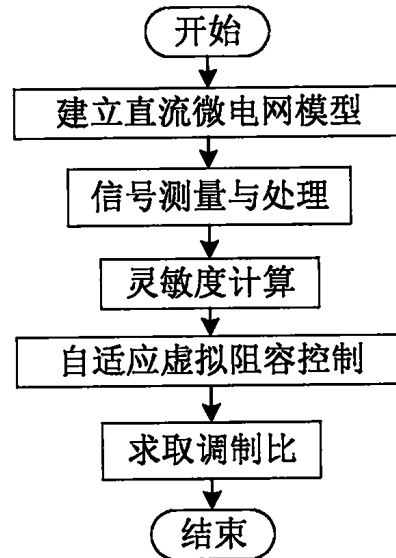
权利要求书2页 说明书4页 附图1页

(54) 发明名称

直流微电网自适应虚拟阻容控制方法

(57) 摘要

本发明公开了一种直流微电网并网变换器的自适应虚拟阻容控制方法,包括建立直流微电网模型、信号测量与处理、灵敏度计算、自适应虚拟阻容控制和求取调制比。本发明采用自适应虚拟阻容控制方法,同时引入自适应虚拟电阻和自适应虚拟电容,二者共同作用,既减小了采用自适应虚拟电阻控制方法时直流母线电压的降落,又避免了自适应虚拟电容控制方法补偿能力不足的问题,有利于直流微电网的安全稳定运行。



1. 一种直流微电网并网变换器的自适应虚拟阻容控制方法,其特征在于:包括以下步骤:

步骤1:建立直流微电网模型:所述直流微电网包含分布式发电单元、储能单元、负荷单元和交流电网单元,所述直流微电网包含的分布式电源、储能元件、恒功率负荷通过相应的DC-DC或AC-DC变换器连入直流母线,经由并网变换器和滤波装置接入交流电网;所述直流微电网包含的分布式发电单元、储能单元、负荷单元均包括控制系统、测量元件和相应的DC-DC或AC-DC变换器,交流电网单元包括控制系统、测量元件和并网变换器;所述直流微电网包含的分布式发电单元、储能单元、负荷单元控制系统输入端分别与相应的测量元件输出端相连,其输出端与相应的DC-DC或AC-DC变换器输入端相连,交流电网单元控制系统输入端与相应的测量元件输出端相连,其输出端与并网变换器输入端相连;所述直流微电网中测量元件主要包括分布式发电单元、储能单元、负荷单元和交流电网单元的直流母线侧电压传感器和电流传感器以及分布式电源侧、储能元件侧、恒功率负荷侧和交流电网侧的电压传感器和电流传感器;

步骤2:信号测量与处理:通过电压传感器测量交流电网的三相电压 $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$ 、并网变换器并网点三相电压 $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$ 和直流母线电压 $u_{dc}$ ,通过电流传感器测量并网变换器交流侧三相电流 $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ 、并网变换器的直流电流 $i_{dc}$ 和输出电流 $i_o$ ;交流电网三相电压 $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$ 经过锁相环处理,计算得到电网的电压相角 $\theta$ ;对所述交流测量元件输出量进行dq坐标变换得到各电流电压参数在dq旋转坐标系中的d轴分量 $e_d$ 、 $u_d$ 、 $i_d$ 和q轴分量 $e_q$ 、 $u_q$ 、 $i_q$ ;

步骤3:灵敏度计算:式(1)所示为特征根灵敏度计算公式,根据式(1)计算直流侧电容、负荷功率、并网变换器下垂系数和电流控制器参数灵敏度,比较各参数灵敏度大小,灵敏度实部数值越大,系统对该参数变化越敏感,

$$S_K^s = \frac{d(s)}{d(\ln K)} = \frac{\partial(s)/s}{\partial K/K} = \frac{K\partial(s)}{s\partial K} \quad (1)$$

式中: $K$ 为变化的参数, $s$ 为特征方程的根;

步骤4:自适应虚拟阻容控制:增加自适应虚拟阻容控制分别补偿下垂系数和直流母线电容,引入功率因子 $\xi_p$ ,自适应虚拟电阻 $R_{va}$ 和自适应虚拟电容 $C_{va}$ 表达式分别如式(2)、式(3)所示:

$$R_{va} = \xi_p^2 R_v = \left(\frac{u_{dc}^*}{P_m} i_{dc}\right)^2 R_v \quad (2)$$

$$C_{va} = \xi_p^2 R_v = \left(\frac{u_{dc}^*}{P_m} i_{dc}\right)^2 C_v \quad (3)$$

式中: $P_m$ 为并网变换器的额定容量; $u_{dc}^*$ 为直流母线电压参考值; $i_{dc}$ 为直流侧电流; $R_v$ 为固定虚拟电阻; $C_v$ 为固定虚拟电容;

利用自适应虚拟电阻控制补偿下垂系数,得到直流母线电压参考值 $u_{dc}^*$ ,

$$u_{dc}^* = u_N - R_{va} i_{dc}^* \quad (4)$$

式中: $u_N$ 为变换器空载输出电压; $i_{dc}^*$ 为直流侧电流参考值;

利用自适应虚拟电容补偿直流母线电容,得到直流母线电流参考值 $i_{dc}^*$ ;

$$i_{dc}^* = \frac{u_{dc}^* - u_{dc}}{k_g} - sC_{va} u_{dc} \quad (5)$$

式中： $k_g$ 为下垂系数； $u_{dc}$ 为直流母线电压；

步骤5：求取调制比：经过一系列变换得到的控制电压 $u_d$ 和 $u_q$ 经 $\alpha\beta$ 变换后得到两相静止坐标系下的控制电压 $u_\alpha$ 和 $u_\beta$ ，再经过SVPWM调制后得到所述并网变换器的三相调制信号 $s_a$ 、 $s_b$ 、 $s_c$ ，将其送入并网变换器的开关管进行控制。

## 直流微电网自适应虚拟阻容控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种应用于直流微电网并网变换器的自适应虚拟阻容控制方法, 自适应补偿下垂系数和直流侧电容, 用以提高直流微电网系统的稳定性, 属于供电控制技术领域。

### 背景技术

[0002] 为了缓解能源短缺和环境污染双重压力, 太阳能、风能等新能源大量接入电网。直流微电网以其控制结构简单、转换效率高、无需考虑相位同步和无功补偿问题等优点, 成为发挥分布式电源效能的有效途径, 日益受到国内外的关注。

[0003] 直流母线电压是衡量直流微电网内功率平衡的唯一指标, 是直流微电网控制的重要目标。并网变换器作为直流微电网与大电网的接口单元, 对控制直流微电网与大电网的能量交换, 维持直流母线电压稳定和系统安全稳定运行具有关键作用。然而直流微电网中的恒功率负荷表现为负阻尼特性, 大量接入会降低系统阻尼, 引起直流母线电压振荡失稳。同时, 用于消除高频谐波的LC滤波器和变流器之间相互作用, 降低系统稳定裕度, 从而制约直流微电网的应用。因此, 研究提高直流微电网稳定性的方法尤为重要。

[0004] 针对直流微电网的稳定性问题, 众多学者提出了多种解决方法。Wu M等人在IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62 (7): 4552-4562. “A novel stabilization method of LC input filter with constant power loads without load performance compromise in DC microgrids”中引入虚拟电阻有效减小了变换器与LC滤波电路的并联阻抗的谐振峰值, 提高系统稳定性同时保证负载动态性能。伍文华等人在中国电机工程学报, 2018, 38 (15): 4359-4368+4636. “海岛VSC-HVDC输电系统直流阻抗建模、振荡分析与抑制方法”中针对整流站公开了一种虚拟阻感性阻抗稳定性控制方法, 对整流站输出阻抗进行相位矫正, 有效抑制VSC-HVDC输电系统的直流侧振荡。然而, 上述文献均是针对固定运行点下直流微电网稳定性的提高方法, 当恒功率负荷增加, 运行点改变时, 控制策略可能失效。因此, 对于恒功率负荷的大量接入引起的系统振荡失稳, 而固定阻容的阻尼控制策略在负荷功率增加时补偿能力不足的问题, 研究一种自适应虚拟阻容控制方法, 同时引入自适应虚拟电阻和自适应虚拟电容, 二者共同作用, 既减小了采用自适应虚拟电阻控制方法时直流母线电压的降落, 又避免了自适应虚拟电容控制方法补偿能力不足的问题, 有利于直流微电网的安全稳定运行。

### 发明内容

[0005] 本发明要解决的技术问题是提供一种直流微电网并网变换器的自适应虚拟阻容控制方法。

[0006] 为解决上述技术问题, 本发明采用如下技术方案, 包括以下步骤:

[0007] 步骤1: 建立直流微电网模型: 所述直流微电网包含分布式发电单元、储能单元、负荷单元和交流电网单元。所述直流微电网包含的分布式电源、储能元件、恒功率负荷通过相

应的DC-DC或AC-DC变换器连入直流母线,经由并网变换器和滤波装置接入交流电网;所述直流微电网包含的分布式发电单元、储能单元、负荷单元均包括控制系统、测量元件和相应的DC-DC或AC-DC变换器,交流电网单元包括控制系统、测量元件和并网变换器;所述直流微电网包含的分布式发电单元、储能单元、负荷单元控制系统输入端分别与相应的测量元件输出端相连,其输出端与相应的DC-DC或AC-DC变换器输入端相连,交流电网单元控制系统输入端与相应的测量元件输出端相连,其输出端与并网变换器输入端相连;所述直流微电网中测量元件主要包括分布式发电单元、储能单元、负荷单元和交流电网单元的直流母线侧电压传感器和电流传感器以及分布式电源侧、储能元件侧、恒功率负荷侧和交流电网侧的电压传感器和电流传感器;

[0008] 步骤2:信号测量与处理:通过电压传感器测量交流电网的三相电压 $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$ 、并网变换器并网点三相电压 $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$ 和直流母线电压 $u_{dc}$ ,通过电流传感器测量并网变换器交流侧三相电流 $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ 、并网变换器的直流电流 $i_{dc}$ 和输出电流 $i_o$ ;交流电网三相电压 $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$ 经过锁相环处理,计算得到电网的电压相角 $\theta$ ;对所述交流测量元件输出量进行dq坐标变换得到各电流电压参数在dq旋转坐标系中的d轴分量 $e_d$ 、 $u_d$ 、 $i_d$ 和q轴分量 $e_q$ 、 $u_q$ 、 $i_q$ ;

[0009] 步骤3:灵敏度计算:式(1)所示为特征根灵敏度计算公式,根据式(1)计算直流侧电容、负荷功率、并网变换器下垂系数和电流控制器参数灵敏度,比较各参数灵敏度大小,灵敏度实部数值越大,系统对该参数变化越敏感,

$$[0010] \quad S_K^{s_k} = \frac{d(s)}{d(\ln K)} = \frac{\partial(s)/s}{\partial K/K} = \frac{K\partial(s)}{s\partial K} \quad (1)$$

[0011] 式中: $K$ 为变化的参数, $s$ 为特征方程的根;

[0012] 步骤4:自适应虚拟阻容控制:增加自适应虚拟阻容控制分别补偿下垂系数和直流母线电容,引入功率因子 $\xi_p$ ,自适应虚拟电阻 $R_{va}$ 和自适应虚拟电容 $C_{va}$ 表达式分别如式(2)、式(3)所示:

$$[0013] \quad R_{va} = \xi_p^2 R_v = \left(\frac{u_{dc}^*}{P_m} i_{dc}\right)^2 R_v \quad (2)$$

$$[0014] \quad C_{va} = \xi_p^2 R_v = \left(\frac{u_{dc}^*}{P_m} i_{dc}\right)^2 C_v \quad (3)$$

[0015] 式中: $P_m$ 为并网变换器的额定容量; $u_{dc}^*$ 为直流母线电压参考值; $i_{dc}$ 为直流侧电流; $R_v$ 为固定虚拟电阻; $C_v$ 为固定虚拟电容;

[0016] 利用自适应虚拟电阻控制补偿下垂系数,得到直流母线电压参考值 $u_{dc}^*$ ,

$$[0017] \quad u_{dc}^* = u_N - R_{va} i_{dc}^* \quad (4)$$

[0018] 式中: $u_N$ 为变换器空载输出电压; $i_{dc}^*$ 为直流侧电流参考值;

[0019] 利用自适应虚拟电容补偿直流母线电容,得到直流母线电流参考值 $i_{dc}^*$ :

$$[0020] \quad i_{dc}^* = \frac{u_{dc}^* - u_{dc}}{k_g} - s C_{va} u_{dc} \quad (5)$$

[0021] 式中: $k_g$ 为下垂系数; $u_{dc}$ 为直流母线电压;

[0022] 步骤5:求取调制比:经过一系列变换得到的控制电压 $u_d$ 和 $u_q$ 经 $\alpha\beta$ 变换后得到两相静止坐标系下的控制电压 $u_a$ 和 $u_b$ ,再经过SVPWM调制后得到所述并网逆变器的三相调制信号

$s_a$ 、 $s_b$ 、 $s_c$ ，将其送入并网变换器的开关管进行控制。

[0023] 采用上述技术方案所取得的技术效果在于：

[0024] 本发明采用一种自适应虚拟阻容控制方法，同时引入自适应虚拟电阻和自适应虚拟电容，二者共同作用，既减小了采用自适应虚拟电阻控制方法时直流母线电压的降落，又避免了自适应虚拟电容控制方法补偿能力不足的问题，有利于直流微电网的安全稳定运行。

### 附图说明

[0025] 下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步详细的说明。

[0026] 图1是本发明的流程图；

[0027] 图2是直流微电网的结构示意图；

[0028] 图3是本发明中并网变换器控制原理图。

### 具体实施方式

[0029] 下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步详细的说明。

[0030] 参考图1-图3，一种并网换流器的自适应虚拟阻容控制方法，包括如下步骤：

[0031] 步骤1：建立直流微电网模型：所述直流微电网包含分布式发电单元、储能单元、负荷单元和交流电网单元。所述直流微电网包含的分布式电源、储能元件、恒功率负荷通过相应的DC-DC或AC-DC变换器连入直流母线，经由并网变换器和滤波装置接入交流电网；所述直流微电网包含的分布式发电单元、储能单元、负荷单元均包括控制系统、测量元件和相应的DC-DC或AC-DC变换器，交流电网单元包括控制系统、测量元件和并网变换器；所述直流微电网包含的分布式发电单元、储能单元、负荷单元控制系统输入端分别与相应的测量元件输出端相连，其输出端与相应的DC-DC或AC-DC变换器输入端相连，交流电网单元控制系统输入端与相应的测量元件输出端相连，其输出端与并网变换器输入端相连；所述直流微电网中测量元件主要包括分布式发电单元、储能单元、负荷单元和交流电网单元的直流母线侧电压传感器和电流传感器以及分布式电源侧、储能元件侧、恒功率负荷侧和交流电网侧的电压传感器和电流传感器；

[0032] 步骤2：信号测量与处理：通过电压传感器测量交流电网的三相电压 $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$ 、并网变换器并网点三相电压 $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$ 和直流母线电压 $u_{dc}$ ，通过电流传感器测量并网变换器交流侧三相电流 $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ 、并网变换器的直流电流 $i_{dc}$ 和输出电流 $i_o$ ；交流电网三相电压 $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$ 经过锁相环处理，计算得到电网的电压相角 $\theta$ ；对所述交流测量元件输出量进行dq坐标变换得到各电流电压参数在dq旋转坐标系中的d轴分量 $e_d$ 、 $u_d$ 、 $i_d$ 和q轴分量 $e_q$ 、 $u_q$ 、 $i_q$ ；

[0033] 步骤3：灵敏度计算：式(1)所示为特征根灵敏度计算公式，根据式(1)计算直流侧电容、负荷功率、并网变换器下垂系数和电流控制器参数灵敏度，比较各参数灵敏度大小，灵敏度实部数值越大，系统对该参数变化越敏感，

$$[0034] \quad S_K^{s_k} = \frac{d(s)}{d(\ln K)} = \frac{\partial(s)/s}{\partial K / K} = \frac{K \partial(s)}{s \partial K} \quad (1)$$

[0035] 式中： $K$ 为变化的参数， $s$ 为特征方程的根；

[0036] 表1

	参数	数值	灵敏度(*10 <sup>3</sup> )
	直流母线电容 C/F	0.004	-0.384-j0.92
[0037]	负荷功率 P/kW	20	0.48+j0.08
	下垂控制 k <sub>g</sub> /p. u.	0.03	-0.423-j0.955
	电流控制器参数 k <sub>p</sub>	1	-0.04+j0.594
	电流控制器参数 k <sub>i</sub>	50	0.025-j0.001

[0038] 步骤4:自适应虚拟阻容控制:增加自适应虚拟阻容控制分别补偿下垂系数和直流母线电容,引入功率因子 $\xi_p$ ,自适应虚拟电阻 $R_{va}$ 和自适应虚拟电容 $C_{va}$ 表达式分别如式(2)、式(3)所示:

$$[0039] \quad R_{va} = \xi_p^2 R_v = \left(\frac{u_{dc}^*}{P_m} i_{dc}\right)^2 R_v \quad (2)$$

$$[0040] \quad C_{va} = \xi_p^2 R_v = \left(\frac{u_{dc}^*}{P_m} i_{dc}\right)^2 C_v \quad (3)$$

[0041] 式中: $P_m$ 为并网变换器的额定容量; $u_{dc}^*$ 为直流母线电压参考值; $i_{dc}$ 为直流侧电流; $R_v$ 为固定虚拟电阻; $C_v$ 为固定虚拟电容;

[0042] 利用自适应虚拟电阻控制补偿下垂系数,得到直流母线电压参考值 $u_{dc}^*$ ,

$$[0043] \quad u_{dc}^* = u_N - R_{va} i_{dc}^* \quad (4)$$

[0044] 式中: $u_N$ 为变换器空载输出电压; $i_{dc}^*$ 为直流侧电流参考值;

[0045] 利用自适应虚拟电容补偿直流母线电容,得到直流母线电流参考值 $i_{dc}^*$ :

$$[0046] \quad i_{dc}^* = \frac{u_{dc}^* - u_{dc}}{k_g} - s C_{va} u_{dc} \quad (5)$$

[0047] 式中: $k_g$ 为下垂系数; $u_{dc}$ 为直流母线电压;

[0048] 步骤5:求取调制比:经过一系列变换得到的控制电压 $u_d$ 和 $u_q$ 经 $\alpha\beta$ 变换后得到两相静止坐标系下的控制电压 $u_a$ 和 $u_b$ ,再经过SVPWM调制后得到所述并网逆变器的三相调制信号 $s_a$ 、 $s_b$ 、 $s_c$ ,将其送入并网变换器的开关管进行控制。

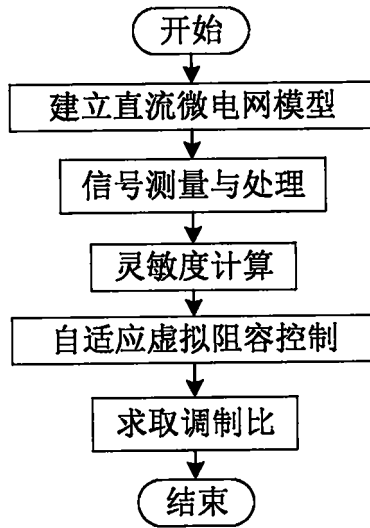


图1

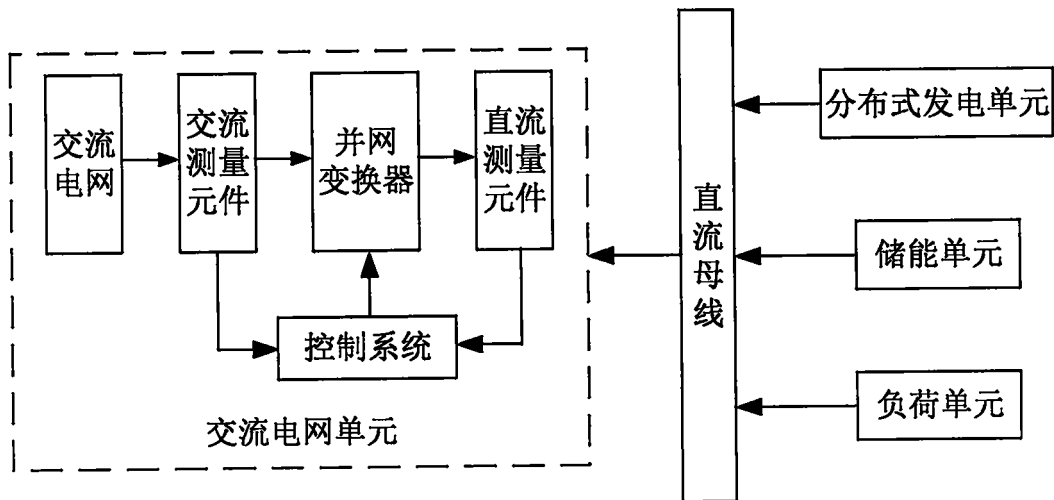


图2

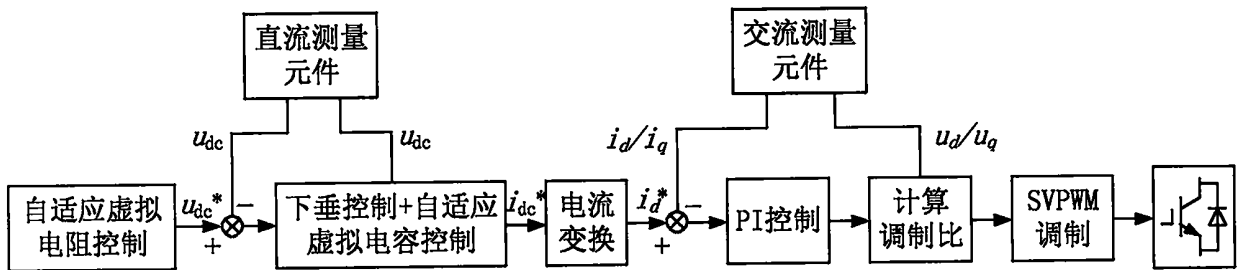


图3