



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105201741 B

(45)授权公告日 2017.09.15

(21)申请号 201510759372.7

(22)申请日 2015.11.10

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 105201741 A

(43)申请公布日 2015.12.30

(73)专利权人 海南电网有限责任公司
地址 570203 海南省海口市海府路34号
专利权人 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司
北京清大高科系统控制有限公司

(72)发明人 顾志东 黄良毅 汤磊 胡微
王志南 李聪 谢磊 何礼鹏
章平 孙浩 张仕鹏 王鹏 陈超

(74)专利代理机构 北京清亦华知识产权代理事务所(普通合伙) 11201

代理人 廖元秋

(51)Int.Cl.
F03D 7/02(2006.01)

(56)对比文件
CN 203839944 U,2014.09.17,
CN 104377724 A,2015.02.25,
CN 102496967 A,2012.06.13,
CN 102856924 A,2013.01.02,
CN 104734166 A,2015.06.24,

审查员 张祥

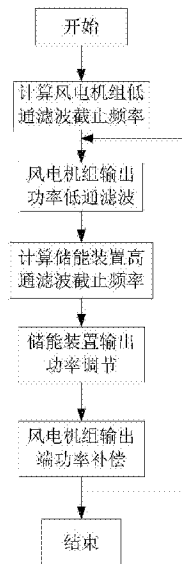
权利要求书2页 说明书5页 附图1页

(54)发明名称

一种风电机组与储能装置的协调平滑控制方法

(57)摘要

本发明涉及一种风电机组与储能装置的协调平滑控制方法,属于并网风电场的安全经济运行与控制技术领域,该方法包括:计算风电机组的低通滤波截止频率,对风电机组输出功率进行低通滤波,计算储能装置高通滤波截止频率,采用该截止频率对该储能装置功率指令进行高通滤波后输出对风电机组进行功率补偿的有功功率对风电机组输出功率的高频部分进行抑制;本发明方法不需对风电机组的控制策略做较大的改动,便于实际应用,对风电机组稳定性及风能利用率的影响较小,同时可有效降低储能装置的容量及成本,延长了储能装置的使用寿命,具有较好的经济效益。



1. 一种风电机组与储能装置的协调平滑控制方法,其特征在于,将储能装置与风电机组输出端并联连接,风电机组机端通过升压变压器及输电线连接到电网公共连接点PCC上,该方法主要包括如下步骤:

步骤1:当控制周期到来时,计算风电机组的低通滤波截止频率:

风电机组从外界自然风中捕获的机械功率表示为:

$$P_{mech} = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) v^3 \quad (1)$$

式(1)中 P_{mech} 为风轮捕获的机械功率, ρ 为空气密度, A 为风轮的扫风面积, $C_p(\lambda, \beta)$ 为风能转换系数, λ 为叶尖速比, β 为叶片的桨距角, v 为风速;

风电机组的传动链方程采用单质量块模型表示为:

$$J_{wt} \frac{d\Omega}{dt} = T_{wt} - T_e - D_{mec} \Omega \quad (2)$$

式(2)中 T_{wt} 是风力机捕获的气动转矩, T_e 是发电机的电磁转矩, Ω 是风电机组转速, J_{wt} 是风电机组总的转动惯量, D_{mec} 是传动链阻尼系数;

将风电机组在某一稳态点(v_0, Ω_0, β_0)作线性化处理,得到相应的转速传递函数;当风速低于额定时风电机组的桨距角保持不变;

由式(1)可知,风电机组捕获的机械功率是风速和转速的函数,可用增量的形式表示为:

$$\begin{cases} P_{mech} = P_{mech_0} + A_1 \cdot \Delta\Omega + A_2 \cdot \Delta v \\ A_1 = \frac{1}{2} \rho A v_0^2 R \frac{\partial C_{p_0}}{\partial \lambda} \\ A_2 = \frac{3}{2} \rho A C_{p_0} v_0^2 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, $\Delta\Omega$ 表示转速增量, Δv 表示风速增量,下标0表示稳态量;由于稳态时 $\frac{\partial C_{p_0}}{\partial \lambda} = 0$,所以式(3)化简为:

$$P_{mech} = P_{mech_0} + \frac{3}{2} \rho A C_{p_0} v_0^2 \Delta v \quad (4)$$

对发电机的有功功率指令进行线性化处理,略去高次项,得到式(5):

$$P_e^* = P_{e_0}^* + (3k_{opt} \Omega_0^2 - 2D_{mec} \Omega_0) \Delta\Omega \quad (5)$$

式(5)中, k_{opt} 为风电机组最优转矩控制系数;

将式(4),(5)代入传动链方程(2),经过拉氏变换并化简,可得风电机组转速对风速的传递函数:

$$\frac{\Omega(s)}{v(s)} = \frac{\rho A C_{p_0} v_0^2}{2k_{opt} \Omega_0^2} \frac{1}{\frac{J_{wt}}{3k_{opt} \Omega_0} s + 1} \quad (6)$$

由式(6)可知,采用最优转矩控制时风电机组转速对风速的响应表现为一阶低通滤波特性;截止频率为 $\omega_0 = \frac{3k_{opt} \Omega_0}{J_{wt}}$,与风电机组的转动惯量、控制参数及转速相关;截止频率 ω_0

将随着风电机组转速 Ω_0 的变化而变化；为提高风电机组对风电功率的滤波能力，令低通滤波截止频率 $\omega_{c1} = \frac{3k_{opt}\Omega_{min}}{J_{wf}}$ ，即低通滤波截止频率 ω_{c1} 由风电机组的最低转速 Ω_{min} 确定；

步骤2：对风电机组输出功率进行低通滤波

根据风电机组当前的转速 Ω 、最优转矩控制系数 k_{opt} 和传动链阻尼系数 D_{mec} 计算出有功功率指令 $P_e^* = k_{opt}\Omega^3 - D_{mec}\Omega^2$ ，采用截止频率为 $\omega_{c1} = \frac{3k_{opt}\Omega_{min}}{J_{wf}}$ 对风电机组的有功功率指令 P_e^* 进行低通滤波；

步骤3：计算储能装置高通滤波截止频率

根据系统运营商对风电机组输出功率最高频率的要求，确定储能装置的高通滤波截止频率，选取系统运营商所允许的风电机组输出功率最高频率作为高通滤波器的截止频率 ω_{c2} ；

步骤4：储能装置输出功率调节

对风电机组输出的有功功率进行测量，将测量得到的功率信号 P_e 传输给储能装置，令储能装置的有功功率指令 $P_{se}^* = -P_e$ ，采用截止频率为 ω_{c2} 对该储能装置功率指令 P_{se}^* 进行高通滤波后输出对风电机组进行功率补偿的有功功率；

步骤5：储能装置输出的有功功率对风电机组输出功率进行补偿

由于储能装置的输出端与风电机组的输出端并联，则通过储能装置输出的功率补偿风电机组输出功率的高频部分，从而达到对风电机组输出功率的平滑控制；

步骤6：等待下一控制周期到来时转步骤1。

一种风电机组与储能装置的协调平滑控制方法

技术领域

[0001] 本发明属于并网风电场的安全经济运行与控制技术领域,尤其涉及一种风电机组与储能装置的协调平滑控制方法。

背景技术

[0002] 风电的波动性和随机性对电网的安全稳定运行产生了较大影响,增加了电网有功平衡和调度的难度,成为制约风电进一步发展的瓶颈。

[0003] 目前对风电机组功率平滑的方案主要有优化的风电机组控制策略和采用外部储能装置两种。

[0004] 通过风电机组控制策略的优化来抑制风电有功功率波动的研究主要集中在风电机组的转矩控制和变桨控制两个方面。转矩控制主要是采用对风电机组转矩或有功功率指令进行低通滤波的方法或使风电机组输出的有功功率跟踪给定的平滑功率曲线的方法来降低由风速引起的风电机组有功功率的波动。该方法会导致风电机组的转速波动增大,可能使风电机组进入不稳定运行区域,同时抑制的风电功率的频段越宽,风电机组出现不稳定的可能性就越大。

[0005] 变桨控制主要是根据风电机组有功功率给定值与实际输出值之间的偏差来调节叶片的桨距角,实现对风电功率低频部分的抑制。变桨控制法能够抑制的风电功率最高频率分量受到变桨执行机构响应速度的限制,而且需要风电机组留有一定的变桨角度余量,该余量的大小将直接影响到风电机组的发电效率。

[0006] 采用储能设备对风电功率进行的平滑控制即利用储能装置的充放电功能来平抑风电功率的一部分频率分量,如带通法、带阻法、高通法等。采用外部储能装置来平滑风电有功功率的最大优点是不需对风电机组的控制策略进行修改,是平滑风电功率波动的有效手段,但是所需储能装置的容量较大,因此储能的成本是一个不容忽视的重要因素。

发明内容

[0007] 本发明的目的是为克服已有技术的不足之处,在分析风电机组引入低通附加控制环节后运行特性的基础上,提出了一种风电机组与储能装置的协调平滑控制方法,可有效降低外部储能装置的容量。

[0008] 本发明提出的一种风电机组与储能装置的协调平滑控制方法,其特征在于,将储能装置与风电机组输出端并联连接,风电机组机端通过升压变压器及输电线连接到电网公共连接点PCC上,该方法主要包括如下步骤:

[0009] 步骤1:当控制周期到来时,计算风电机组的低通滤波截止频率:

[0010] 风电机组从外界自然风中捕获的机械功率表示为:

$$P_{mech} = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) v^3 \quad (1)$$

[0012] 式(1)中 P_{mech} 为风轮捕获的机械功率, ρ 为空气密度, A 为风轮的扫风面积, $C_p(\lambda, \beta)$

为风能转换系数, λ 为叶尖速比, β 为叶片的桨距角, v 为风速;

[0013] 风电机组的传动链方程采用单质量块模型表示为:

$$[0014] \quad J_{wt} \frac{d\Omega}{dt} = T_{wt} - T_e - D_{mec} \Omega \quad (2)$$

[0015] 式(2)中 T_{wt} 是风力机捕获的气动转矩, T_e 是发电机的电磁转矩, Ω 是风电机组转速, J_{wt} 是风电机组总的转动惯量, D_{mec} 是传动链阻尼系数;

[0016] 将风电机组在某一稳态点 (v_0, Ω_0, β_0) 作线性化处理, 得到相应的转速传递函数; 当风速低于额定风速时风电机组的桨距角保持不变;

[0017] 由式(1)可知, 风电机组捕获的机械功率是风速和转速的函数, 可用增量的形式表示为:

$$[0018] \quad \begin{cases} P_{mech} = P_{mech_0} + A_1 \cdot \Delta\Omega + A_2 \cdot \Delta v \\ A_1 = \frac{1}{2} \rho A v_0^2 R \frac{\partial C_{p_0}}{\partial \lambda} \\ A_2 = \frac{3}{2} \rho A C_{p_0} v_0^2 \end{cases} \quad (3)$$

[0019] 式(3)中, $\Delta\Omega$ 表示转速增量, Δv 表示风速增量, 下标0表示稳态量; 由于稳态时 $\frac{\partial C_{p_0}}{\partial \lambda} = 0$, 所以式(3)化简为:

$$[0020] \quad P_{mech} = P_{mech_0} + \frac{3}{2} \rho A C_{p_0} v_0^2 \Delta v \quad (4)$$

[0021] 对发电机的有功功率指令进行线性化处理, 略去高次项, 得到式(5):

$$[0022] \quad P_e^* = P_{e_0}^* + (3k_{opt} \Omega_0^2 - 2D_{mec} \Omega_0) \Delta\Omega \quad (5)$$

[0023] 式(5)中, k_{opt} 为风电机组最优转矩控制系数;

[0024] 将式(4), (5)代入传动链方程(2), 经过拉氏变换并化简, 可得风电机组转速对风速的传递函数:

$$[0025] \quad \frac{\Omega(s)}{v(s)} = \frac{\rho A C_{p_0} v_0^2}{2k_{opt} \Omega_0^2} \frac{1}{\frac{J_{wt}}{3k_{opt} \Omega_0} s + 1} \quad (6)$$

[0026] 由式(6)可知, 采用最优转矩控制时风电机组转速对风速的响应表现为一阶低通滤波特性; 截止频率为 $\omega_0 = \frac{3k_{opt} \Omega_0}{J_{wt}}$, 与风电机组的转动惯量、控制参数及转速相关; 截止频率

ω_0 将随着风电机组转速 Ω_0 的变化而变化; 为提高风电机组对风电功率的滤波能力, 令低通滤波截止频率 $\omega_{cl} = \frac{3k_{opt} \Omega_{min}}{J_{wt}}$, 即低通滤波截止频率 ω_{cl} 由风电机组的最低转速 Ω_{min} 确定;

[0027] 步骤2: 对风电机组输出功率进行低通滤波:

[0028] 根据风电机组当前的转速 Ω 、最优转矩控制系数 k_{opt} 和传动链阻尼系数 D_{mec} 计算出有功功率指令 $P_e^* = k_{opt} \Omega^3 - D_{mec} \Omega^2$, 采用截止频率为 $\omega_{cl} = \frac{3k_{opt} \Omega_{min}}{J_{wt}}$ 对风电机组的有功功率指令

P_e^* 进行低通滤波；

[0029] 步骤3: 计算储能装置高通滤波截止频率：

[0030] 根据系统运营商对风电机组输出功率最高频率的要求，确定储能装置的高通滤波截止频率。选取系统运营商所允许的风电机组输出功率最高频率作为高通滤波器的截止频率 ω_{c2} ；

[0031] 步骤4: 储能装置输出功率调节

[0032] 对风电机组输出的有功功率进行测量，将测量得到的功率信号 P_e 传输给储能装置，令储能装置的有功功率指令 $P_{se}^* = -P_e$ ，采用截止频率为 ω_{c2} 对该储能装置功率指令 P_{se}^* 进行高通滤波后输出对风电机组进行功率补偿的有功功率；

[0033] 步骤5: 储能装置输出的有功功率对风电机组输出功率进行补偿：

[0034] 由于储能装置的输出端与风电机组的输出端并联，则通过储能装置输出的功率补偿风电机组输出功率的高频部分，从而达到对风电机组输出功率的平滑控制；

[0035] 步骤6: 等待下一控制周期到来时转步骤1。

[0036] 本发明所采取的技术方案的特点及有益效果是：

[0037] 本方法在风电机组的最优转矩控制中引入一个低于风电机组固有频率的低通滤波，对风电机组的有功功率指令进行低通滤波，从而降低风电机组输出功率中的高频分量。

[0038] 本方法对风电机组的输出功率进行测量并将测量的功率信号 P_e 输送给储能装置。令储能装置的有功功率指令 $P_{se}^* = -P_e$ ，根据系统运营商对风电机组输出功率最高频率的要求，确定储能装置高通滤波的截止频率。储能装置对功率指令 P_{se}^* 进行高通滤波后输出有功功率。将储能装置的输出端与风电机组的输出端并联，通过储能装置输出的功率补偿风电机组输出功率的高频部分，从而达到对风电机组输出功率的平滑控制。

[0039] 由于对风电机组的有功功率指令进行了低通滤波，风电功率中的一部分高频分量已被风电机组的惯性滤除，因此有效降低了储能装置的容量及输出功率的变化率，在一定程度上延长了储能装置的使用寿命。

[0040] 与现有技术相比，本发明方法不需对风电机组的控制策略做较大的改动，便于实际应用，对风电机组稳定性及风能利用率的影响较小，同时可有效降低储能装置的容量及成本，延长了储能装置的使用寿命，具有较好的经济效益。

附图说明

[0041] 图1为适用于本发明的风电机组与储能装置拓扑结构图。

[0042] 图2为本发明的一种风电机组与储能装置的协调平滑控制流程图。

具体实施方式

[0043] 下面结合附图及实施例对本发明进一步说明。

[0044] 适用于本发明的风电机组与储能装置的拓扑结构如图1所示，包括风电机组1，储能装置2，升压变压器3；其中，储能装置2与风电机组1输出端并联连接，风电机组1机端通过升压变压器3及输电线连接到电网公共连接点PCC上。风电机组输出功率为 P_1 ，储能装置输出功率为 P_2 ，系统并网功率为 P_3 。

[0045] 本发明一种风电机组与储能装置的协调平滑控制方法实现流程,如图2所示,主要包括如下步骤:

[0046] 步骤1:当控制周期到来时(控制周期的典型值为20ms),计算风电机组的低通滤波截止频率:

[0047] 风电机组从外界自然风中捕获的机械功率表示为:

$$[0048] \quad P_{mech} = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) v^3 \quad (1)$$

[0049] 式(1)中 P_{mech} 为风轮捕获的机械功率, ρ 为空气密度, A 为风轮的扫风面积, $C_p(\lambda, \beta)$ 为风能转换系数, λ 为叶尖速比, β 为叶片的桨距角, v 为风速;

[0050] 风电机组的传动链方程采用单质量块模型表示为:

$$[0051] \quad J_{wt} \frac{d\Omega}{dt} = T_{wt} - T_e - D_{mec} \Omega \quad (2)$$

[0052] 式(2)中 T_{wt} 是风力机捕获的气动转矩, T_e 是发电机的电磁转矩, Ω 是风电机组转速, J_{wt} 是风电机组总的转动惯量, D_{mec} 是传动链阻尼系数;

[0053] 将风电机组在某一稳态点(v_0, Ω_0, β_0)作线性化处理,得到相应的转速传递函数;当风速低于额定时风电机组的桨距角保持不变;

[0054] 由式(1)可知,风电机组捕获的机械功率是风速和转速的函数,可用增量的形式表示为:

$$[0055] \quad \begin{cases} P_{mech} = P_{mech_0} + A_1 \cdot \Delta\Omega + A_2 \cdot \Delta v \\ A_1 = \frac{1}{2} \rho A v_0^2 R \frac{\partial C_p}{\partial \lambda} \\ A_2 = \frac{3}{2} \rho A C_p v_0^2 \end{cases} \quad (3)$$

[0056] 式(3)中, $\Delta\Omega$ 表示转速增量, Δv 表示风速增量,下标0表示稳态量;由于稳态时 $\frac{\partial C_p}{\partial \lambda} = 0$,所以式(3)化简为:

$$[0057] \quad P_{mech} = P_{mech_0} + \frac{3}{2} \rho A C_p v_0^2 \Delta v \quad (4)$$

[0058] 对发电机的有功功率指令进行线性化处理,略去高次项,得到式(5):

$$[0059] \quad P_e^* = P_{e_0}^* + (3k_{opt} \Omega_0^2 - 2D_{mec} \Omega_0) \Delta\Omega \quad (5)$$

[0060] 式(5)中, k_{opt} 为风电机组最优转矩控制系数;

[0061] 将式(4),(5)代入传动链方程(2),经过拉氏变换并化简,可得风电机组转速对风速的传递函数:

$$[0062] \quad \frac{\Omega(s)}{v(s)} = \frac{\rho A C_p v_0^2}{2k_{opt} \Omega_0^2} \frac{1}{3k_{opt} \Omega_0} \frac{1}{J_{wt} s + 1} \quad (6)$$

[0063] 由式(6)可知,采用最优转矩控制时风电机组转速对风速的响应表现为一阶低通

滤波特性；截止频率为 $\omega_0 = \frac{3k_{opt}\Omega_0}{J_{wt}}$ ，与风电机组的转动惯量、控制参数及转速相关；截止频率 ω_0 将随着风电机组转速 Ω_0 的变化而变化；为提高风电机组对风电功率的滤波能力，令低通滤波截止频率 $\omega_{c1} = \frac{3k_{opt}\Omega_{min}}{J_{wt}}$ ，即低通滤波截止频率 ω_{c1} 由风电机组的最低转速 Ω_{min} 确定；

[0064] 步骤2：对风电机组输出功率进行低通滤波：

[0065] 根据风电机组当前的转速 Ω 、最优转矩控制系数 k_{opt} 和传动链阻尼系数 D_{mec} 计算出有功功率指令 $P_e^* = k_{opt}\Omega^3 - D_{mec}\Omega^2$ ，采用截止频率为 $\omega_{c1} = \frac{3k_{opt}\Omega_{min}}{J_{wt}}$ 对风电机组的有功功率指令

P_e^* 进行低通滤波；

[0066] 步骤3：计算储能装置高通滤波截止频率：

[0067] 根据系统运营商对风电机组输出功率最高频率的要求，确定储能装置的高通滤波截止频率。选取系统运营商所允许的风电机组输出功率最高频率作为高通滤波器的截止频率 ω_{c2} ；

[0068] 步骤4：储能装置输出功率调节：

[0069] 对风电机组输出的有功功率进行测量，将测量得到的功率信号 P_e 传输给储能装置，令储能装置的有功功率指令 $P_{se}^* = -P_e$ ，采用截止频率为 ω_{c2} 对该储能装置功率指令 P_{se}^* 进行高通滤波后输出对风电机组进行功率补偿的有功功率；

[0070] 步骤5：储能装置输出的有功功率对风电机组输出功率进行补偿：

[0071] 由于储能装置的输出端与风电机组的输出端并联，则通过储能装置输出的功率补偿风电机组输出功率的高频部分，从而达到对风电机组输出功率的平滑控制；

[0072] 步骤6：等待下一控制周期到来时转步骤1。

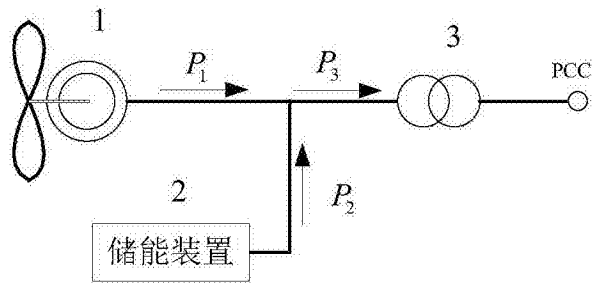


图1

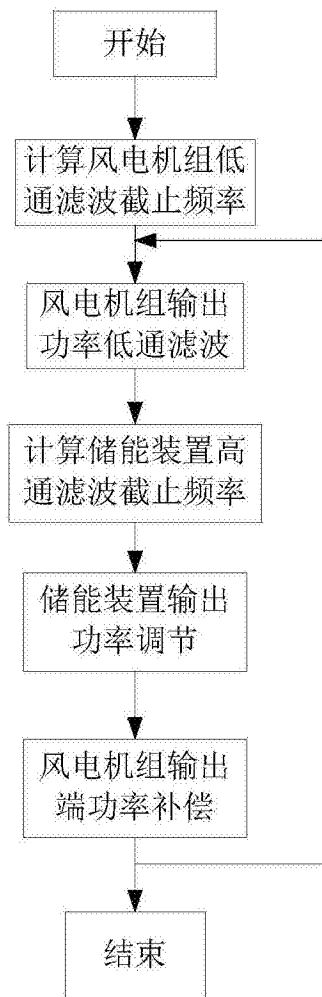


图2