

光储一体化并网发电系统的惯量阻尼机理分析

吴永斌¹, 王素娥¹, 熊连松^{2, 3}, 张东辉⁴, 许 昭³

(1. 陕西科技大学电气与控制工程学院, 陕西省西安市 710021; 2. 南京工程学院自动化学院, 江苏省南京市 211167;
3. 香港理工大学电机工程系, 香港 999077; 4. 湖南工业大学电气与信息工程学院, 湖南省株洲市 412007)

摘要: 以光储一体化并网发电系统为研究对象, 利用多时间尺度建模的思想, 聚焦于影响系统频率动态特性的主要时间尺度——直流电压时间尺度, 建立了用于系统惯量阻尼特性分析的直流电压时间尺度动态模型。在此模型的基础上, 利用电气转矩分析法从物理机制层面上分析了影响系统惯量效应、阻尼能力以及同步特性的主要因素及其作用规律。研究表明: 系统的动态特性由其控制参数、结构参数以及稳态工作点参数共同决定。直流电压母线控制环中的比例控制器、积分控制器分别影响系统的惯性效应和同步特性; 储能装置中的频率下垂控制主要影响系统的阻尼能力; 工作在最大功率点跟踪模式的光伏变流器则无法影响系统的动态特性。此外, 系统的动态特性还受到线路阻抗、直流母线电容等结构参数以及系统交/直流母线电压等级、稳态运行功率(功角)等稳态工作点参数的共同影响。仿真和实验结果验证了上述分析结论的正确性。

关键词: 并网发电系统; 光伏; 储能系统; 直流电压时间尺度; 多时间尺度建模; 电气转矩分析法; 惯量阻尼特性

0 引言

全球能源危机和环境污染背景下, 高渗透率的可再生能源发电系统受到了广泛关注。其中, 以光伏(photovoltaic, PV)发电为代表的可再生能源并网发电系统高比例接入电网, 将成为新一代电力系统的基本特征^[1-2]。

惯量效应与阻尼能力是传统电力系统的基本特征, 对电网频率稳定性至关重要。但随着光伏并网在电网中渗透率的不断提高, 电力系统的惯量效应与阻尼特性被相对削弱, 给电力系统的稳定性带来了新的挑战^[3-5]。目前, 学术界对光伏系统的惯性认识很不一致, 光伏系统由电力电子设备构成, 响应速度快, 惯量弱甚至没有惯量, 难以参与电网频率调节^[6-9]。为了解决光伏系统低惯量的问题, 有学者借鉴传统电力系统中同步机特性, 提出了虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制策略, 使并网逆变器从内部机理和外特性上、物理模型和数学方程上均较好地等效传统同步机^[10-12]。文献[13]利用VSG技术模拟传统同步机特性, 提升光伏并网发电系统的备用旋转惯量; 文献[14]提出变步

长功率跟踪的有功备用的PV-VSG策略, 为光伏系统提供惯性及阻尼支撑; 文献[15]提出一种变速风电机组的虚拟惯量控制方法, 能够为系统提供相应惯量动态响应。此外, 有文献研究表明, 各种控制策略在一定程度上均能模拟惯量特性^[16-17], 然而其表现出惯量特性的物理机理尚不明确。因此, 有必要从物理机制层面去分析影响可再生能源并网发电系统的惯量阻尼及同步特性的因素和作用规律。

针对可再生能源并网发电系统的惯量阻尼机理研究, 文献[17-20]充分利用多时间尺度的思想, 抓住所关注的时间尺度, 忽略其他动态过程, 建立系统的数学模型。文献[21]将电力电子化电网的动态行为划分为交流电流、直流电压和机械转速等3个时间尺度。其中, 惯量特性主要受直流电压时间尺度的动态过程影响, 所以分析变流器系统的惯量特性主要就是分析直流尺度的动态过程。文献[17]类比传统的旋转式同步发电机的研究方法, 利用经典的电气转矩分析法从物理含义上去分析新能源并网发电系统的动态特性, 但仅从逆变器本体的角度去研究惯量阻尼, 没有考虑一次能源的动态过程。文献[18-19]结合电池储能系统, 在直流电压时间尺度下, 分析功频下垂和频率下垂2种控制策略下, 影响并网储能控制系统的惯量阻尼作用规律。文献[20]利用多时间尺度建模的思想, 研究风电场惯量控制, 以提高电力系统的频率稳定性。

收稿日期: 2019-03-08; 修回日期: 2019-07-18。

上网日期: 2020-02-03。

国家自然科学基金资助项目(51707091); 陕西省工业科技攻关项目(2015GY038)。

综上所述,目前学术界鲜见科学的分析来说明光伏系统究竟是否有惯量阻尼特性,以及光伏系统的惯性阻尼特性的影响规律。本文以典型控制策略下的光储一体化并网发电系统为研究对象,分析系统整体的惯量阻尼特性。首先,建立直流电压时间尺度的数学模型;其次,利用电气转矩分析法从物理层面来研究影响系统的惯量、阻尼以及同步规律;最后,利用仿真和实验验证了分析结论的正确性。

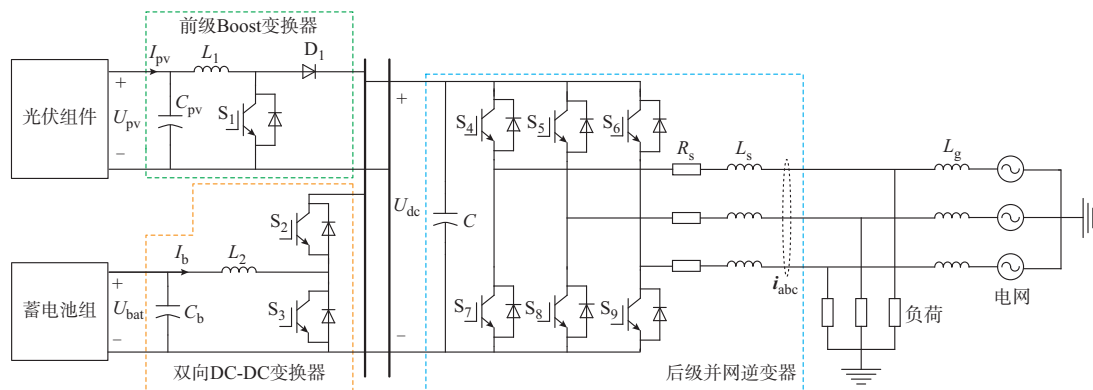


图1 光储一体化并网发电系统的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of grid-connected power generation system integrated with PV and ESS

1.1 前级Boost变换器控制策略

图2为前级Boost变换器的控制框图,其中PWM表示脉宽调制,PI表示比例-积分控制器。首先,通过MPPT算法获得最大功率对应的光伏阵列直流电压,作为外环电压控制的参考信号,再采用直流电压外环、电流内环进行控制^[22]。

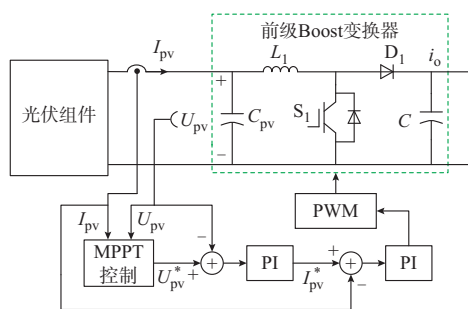


图2 前级Boost变换器的控制框图

Fig. 2 Block diagram of control for pre-stage Boost converter

电流内环的动态过程远快于直流电压外环,从多时间尺度建模的角度来看,电流内环的动态过程可以忽略^[21]。因此,光伏组件和前级Boost变换器的输出电流可以表示为:

$$I_{pv} = I_{pv}^* = \left(K_p^* + \frac{K_i^*}{s} \right) (U_{pv}^* - U_{pv}) \quad (1)$$

式中: U_{pv} 和 I_{pv} 分别为光伏组件的输出电压与电流;

1 系统的拓扑结构与控制策略

本文在常规光伏发电系统的直流母线上增加了储能系统(energy storage system, ESS),构成了光储一体化并网发电系统,如图1所示,该系统不但能够实现最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制,还可响应光伏和负荷波动导致的电网频率变化事件。

U_{pv}^* 和 I_{pv}^* 分别为光伏组件的电压与电流给定值; K_p^* 和 K_i^* 分别为光伏侧直流电压外环的比例系数和积分系数。

1.2 双向DC/DC变换器控制策略

利用双向DC/DC变换器对蓄电池进行控制,即可在确保光伏系统实现MPPT的同时也能平抑负荷的波动。其中,图3是双向DC/DC变换器的控制框图,采用频率下垂外环、电流内环的控制策略。

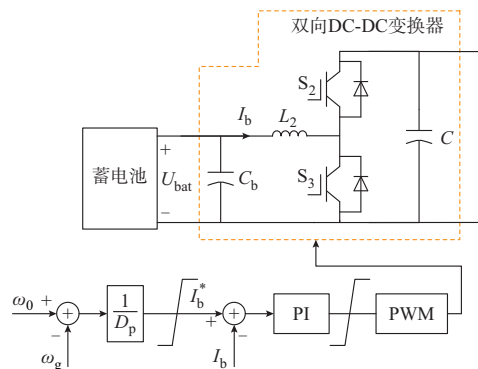


图3 双向DC/DC变换器的控制框图

Fig. 3 Block diagram of control for bidirectional DC/DC converter

忽略电感电流的动态过程,只考虑频率下垂外环的调节过程^[21]。蓄电池的输出电流 I_b 满足:

$$I_b = I_b^* = \frac{1}{D_p} (\omega_0 - \omega_g) \quad (2)$$

式中: I_b^* 为蓄电池电流的给定值; D_p 为频率下垂外环的下垂系数; ω_0 和 ω_g 分别为同步角频率与实测的电网角频率。

1.3 后级并网逆变器控制策略

后级并网逆变器采用直流电压外环、电流内环

的常规双闭环控制,如图4所示,其中PLL表示锁相环。直流电压控制环用于维持逆变器直流侧电压不变,由于不考虑无功功率对系统的影响,设定无功电流给定值 I_q^* 恒为零。其中, U_{dc}^* 和 U_{dc} 分别为直流电压给定值与检测值。

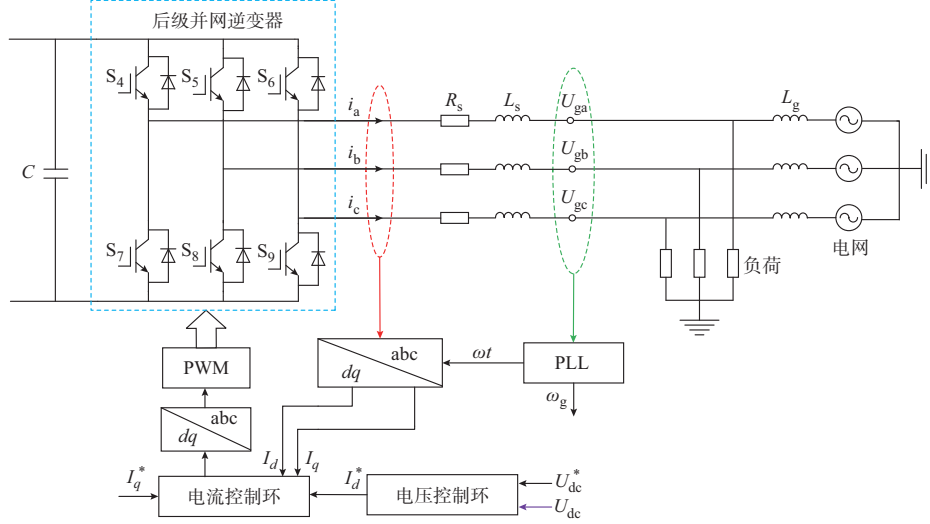


图4 后级并网逆变器的控制框图

Fig. 4 Block diagram of control for rear-stage grid-connected inverter

同样忽略电流内环的动态,从直流电压时间尺度的角度对系统进行分析。后级并网逆变器的输出电流 I_d 可以表述为:

$$I_d = I_d^* = -\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(U_{dc}^* - U_{dc}) \quad (3)$$

式中: I_d^* 为有功电流给定值; K_p 和 K_i 分别为直流母线电压外环PI控制器的比例系数和积分系数。

2 光储一体化系统的动态特性分析

2.1 系统动态特性分析的理论基础

类比旋转式同步发电机的静态稳定性及失稳机制分析方法,光储一体化并网发电系统的直流电压时间尺度动态过程用增量方程表述为:

$$2H \frac{d\Delta U_{dc}}{dt} = \Delta P_{in} - \Delta P_e \quad (4)$$

式中: $H = 0.5CU_{dc0}^2/S_B$ 为系统的惯性时间常数,其中 C 为直流母线电容, S_B 为系统的额定容量, U_{dc0} 为直流侧母线电压稳态工作点参数; ΔU_{dc} 为直流母线电压的变化量; ΔP_{in} 为输入有功功率的变化量; ΔP_e 为电磁功率的变化量。

为了进一步分析光储一体化并网发电系统的惯量、阻尼以及同步特性,借鉴文献[17]提出的电气转矩法,可以从物理机制层面分析系统的稳定性。其直流电压时间尺度动态过程的标准方程为:

$$\begin{cases} \frac{d\Delta\delta}{dt} = \Delta\omega \\ T_J \frac{d\Delta\omega}{dt} = -T_D\Delta\omega - T_S\Delta\delta \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\Delta\delta$ 和 $\Delta\omega$ 分别为系统的功角和角频率的变化量; T_J , T_D , T_S 分别为系统的等效惯性系数、阻尼系数和同步系数,表征系统的惯性水平、阻尼与同步能力^[16]。

2.2 系统的直流电压时间尺度动态模型

光伏组件和前级 Boost 变换器的输出功率 P_{pv} 可以表示为:

$$P_{pv} = U_{pv} I_{pv} = P_{mpp} \quad (6)$$

式中: P_{mpp} 为光伏系统输出的最大功率。

由于光伏以最大功率输出,不响应电网频率事件,对整个系统不产生动态影响。线性化式(6),可得光伏系统的功率变化量 ΔP_{pv} :

$$\Delta P_{pv} = 0 \quad (7)$$

蓄电池和双向 DC/DC 变换器的输出功率 P_b 可以表示为:

$$P_b = U_b I_b \quad (8)$$

式中: U_b 为蓄电池的输出电压。

将式(2)代入式(8),并进行线性化可得:

$$\Delta P_b = \frac{-U_b \Delta\omega}{D_p} \quad (9)$$

对后级并网逆变器的主电路进行简化分析,如

附录 A 图 A1 所示。由该图易知, 后级并网逆变器输出的电磁功率 P_e 可以表示为:

$$P_e = \frac{1.5U_s U_g \sin \delta}{X} \quad (10)$$

式中: U_s 为并网逆变器的励磁电势幅值, 与并网逆变器滤波前出口电压的基波分量对应; U_g 为并网逆变器的幅值, 与电网端电压对应; δ 为后级并网逆变器与电网端电压之间的相角差; $X = \omega_0 L$, 其中 L 为等效线路阻抗。

线性化式(10), 可得:

$$\Delta P_e = 1.5K U_g \Delta \delta \quad (11)$$

式中: $K = U_s \cos \delta_0 / X$, 其中 δ_0 为功角的稳态工作点参数。

在并网逆变器的建模与分析中, 常采用基于电网电压矢量定向的同步旋转坐标系, 使电网电压矢量 U_g 与同步旋转坐标系的 d 轴重合^[23], 如附录 A 图 A2 所示。其中并网逆变器的励磁电势幅值 U_s 以同步角频率 ω_0 旋转, 而电网端电压 U_g 以 d 轴为基准, 按照角频率 ω_g 进行旋转, φ 为并网逆变器的端电压与输出电流之间的相差角, Φ 为并网逆变器的励磁电势与输出电流之间的相差角。

由附录 A 图 A2 所示的基于电网电压定向的并网逆变器矢量图易得:

$$I_d = \frac{U_s \sin \delta}{X} \quad (12)$$

结合式(3)和式(12), 可得:

$$\frac{U_s}{X} \sin \delta = -\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(U_{dc}^* - U_{dc}) \quad (13)$$

式(13)线性化之后, 可表示为:

$$sK\Delta\delta = (sK_p + K_i)\Delta U_{dc} \quad (14)$$

进一步化简式(14), 可得:

$$\Delta U_{dc} = \frac{sK\Delta\delta}{sK_p + K_i} \quad (15)$$

整个系统的输入功率 P_{in} 可以表示为:

$$P_{in} = P_{pv} + P_b \quad (16)$$

将式(7)和式(9)代入线性化的式(16), 可得:

$$\Delta P_{in} = \Delta P_{pv} + \Delta P_b = -\frac{U_b}{D_p} \Delta \omega \quad (17)$$

将式(11)、式(15)和式(17)共同代入式(4), 可得:

$$2H \frac{s^2 K \Delta \delta}{sK_p + K_i} = -\frac{U_b}{D_p} \Delta \omega - \frac{3}{2} K U_g \Delta \delta \quad (18)$$

对式(18)进行化简, 可得:

$$\begin{aligned} \left(2KH + \frac{K_p}{D_p} U_b\right) \frac{d\Delta\omega}{dt} = \\ -\left(\frac{3}{2} K K_p U_g + \frac{K_i}{D_p} U_b\right) \Delta\omega - \frac{3}{2} K K_i U_g \Delta\delta \end{aligned} \quad (19)$$

将式(19)与式(5)所示的标准方程进行对比, 可得系统的等效惯量、阻尼与同步参数为:

$$\begin{cases} T_J = 2KH + \frac{K_p}{D_p} U_b = 2 \frac{C U_s U_{dc0}^2}{S_B X} \cos \delta_0 + \frac{K_p}{D_p} U_b \\ T_D = \frac{3}{2} K K_p U_g + \frac{K_i U_b}{D_p} = \\ \quad \frac{3}{2} \frac{K_p U_s U_g}{X} \cos \delta_0 + \frac{K_i}{D_p} U_b \\ T_S = \frac{3}{2} K K_i U_g = \frac{3}{2} K_i \frac{U_s U_g}{X} \cos \delta_0 \end{cases} \quad (20)$$

由式(20)可知: 系统的惯量阻尼与同步效应不仅与系统的控制参数(K_p, K_i, D_p)有关, 还受系统的结构参数(C 和 L)和稳态工作点参数($U_s, U_g, U_{dc0}, \delta_0, U_b$)共同影响。同时, 由式(20)的 T_J 表达式可知: 系统的惯量效应主要由直流母线电容 C 和蓄电池电压 U_b 共同提供。而由式(20)的 T_D 表达式可知: 系统的阻尼效应主要受蓄电池电压 U_b 影响。因此, 工作在 MPPT 模式下的光伏不能影响系统的惯量阻尼特性, 只有跟电网频率耦合起来才可以提供惯量效应。

2.3 系统动态特性的规律分析

2.3.1 控制参数的影响规律分析

系统的惯量阻尼与同步效应受控制参数 D_p, K_p, K_i 的影响, 且控制参数与系统的效应之间存在耦合关系。附录 A 图 A3 分别给出了系统等效的惯量阻尼与同步系数与控制参数之间的数值关系。其中: $C=1.0, U_s=1.0, U_{dc}=1.0, S_B=1.0, X=1.0, U_b=1.0, U_g=1.0$, 均为标幺值; $\delta_0 = \pi/3$ 。

由于系统的等效同步系数 T_S 只受控制参数 K_i 影响, K_i 对 T_S 的影响规律如附录 A 图 A3(a) 所示, 随着 K_i 的增加, T_S 线性增加。在假定 K_i 不变的情况下, D_p 和 K_p 对系统的等效惯量阻尼影响规律如附录 A 图 A3(b) 和 (c) 所示, 随着 D_p 的减小或者 K_p 的增加, 系统的等效惯性系数 T_J 和等效阻尼系数 T_D 明显增强。对比附录 A 图 A3(b) 和 (c) 发现: T_J 受 K_p 的影响明显, 而 T_D 受 D_p 的影响明显。因此, 直流电压外环 PI 控制器的积分系数 K_i 主要影响系统的同步特性, 下垂系数 D_p 主要影响系统的阻尼特性, 而直流电压外环 PI 控制器的比例系数 K_p 主要影响系统的惯量特性。

2.3.2 结构参数的影响规律分析

影响系统惯量阻尼与同步效应的主要结构参数是直流母线电容 C 和连接阻抗 X 。其中, 随着 C 的增大, 存储或者释放的能量越多, 抑制干扰的能力越

强,意味着系统的惯性效应越强,因此可以通过增加直流母线电容来提高系统的惯量特性;而随着 X 的减小,系统与无穷大电网之间的电气距离越近,受大电网的耦合程度越强,系统的惯量阻尼与同步能力都增强^[16],因此可以通过减小线路阻抗或减小与大电网的安装距离来提高系统的惯量阻尼与同步特性。

2.3.3 稳态工作点参数的影响规律分析

系统的惯性阻尼与同步效应受稳态工作点参数 $U_s, U_g, U_{dc0}, \delta_0$ 和 U_b 等共同影响,其中,直流侧母线电压 U_{dc0} 直接影响系统的等效惯性系数 T_J ,且随着 U_{dc0} 的增加,系统的惯性效应增强,原因是电压越高,电容储能越多,抑制外界干扰的能力越强;蓄电池电压 U_b 同时影响惯量阻尼效应,且随着 U_b 的增加,系统的惯量阻尼效应增强,电压越高,同样时间、同等电流等级下释放的功率越大,作用程度越强; U_g 影响系统的阻尼与同步效应,且随着 U_g 的增加,系统的阻尼与同步能力增强; U_s 和 δ_0 同时影响系统

的惯量阻尼与同步效应,随着 U_s 的增加, T_J, T_D, T_S 同时增强,而 δ_0 要根据系统的稳定裕度和装机容量进行合理选择。由此可知:并网的电压等级越高,系统的电气稳定性越好^[17],因此对弱系统下的光伏系统,应当尽力提高入网电压等级,提高光伏并网系统的并网稳定性。

2.4 系统的能量流图

光储一体化并网发电系统的能量流图如图5所示,系统由光伏、储能和并网逆变器组成。其中,利用光伏和前级Boost变换器进行MPPT控制,作为系统的主要功率输入,如图中绿色箭头所示;后级并网逆变器采用常规的电压电流双闭环控制,红线箭头所示是系统的负荷功率回路;蓄电池利用双向DC/DC变换器进行下垂控制,用来响应电网的频率波动,即平衡源荷的不平衡,蓝色曲线代表储能装置响应源荷不平衡的动态过程;橙色箭头表示光伏或储能的能量流动方向。在扰动下,光伏保持恒功率运行,储能响应电网频率的动态。

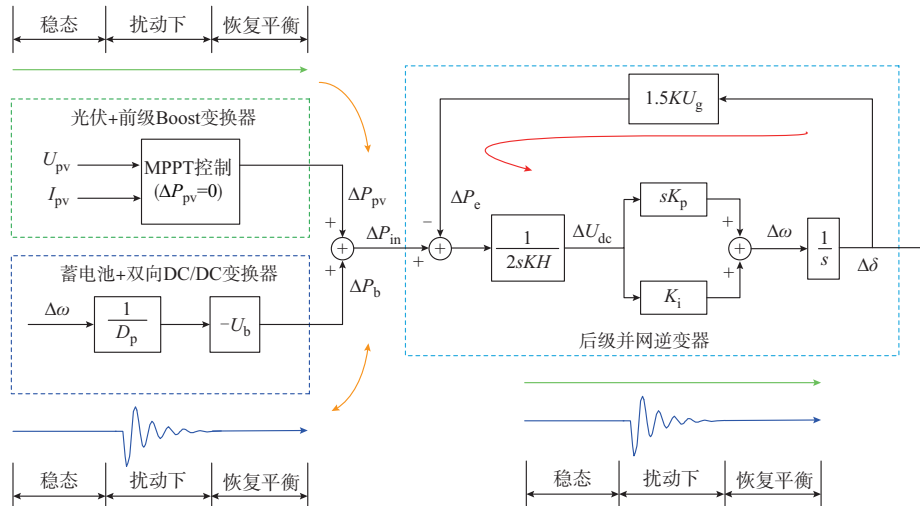


图5 系统的能量流图

Fig. 5 Diagram of system energy flow

3 仿真结果与分析

为了验证上述分析结论的正确性,利用MATLAB/Simulink仿真平台搭建光储一体化并网发电系统仿真模型。其中,光伏的容量为10 kW,蓄电池的容量为10 kW·h,并网换流器的容量为20 kW,交流电网采用下垂控制的变流器模拟有限的弱电网(有限的弱电网容量为20 kW),以此来模拟电力电子装置主导的电力系统。系统的仿真参数如附录B表B1所示,系统仿真运行到1 s时,光伏组件发生一个光照强度扰动,分析不同控制参数、结构参数和稳态工作点参数下,系统交流侧频率 f

和直流母线电压 U_{dc} 的变化规律,以反映系统的惯量、阻尼以及同步特性的强弱程度。

3.1 系统的惯量特性验证

光储一体化并网发电系统的惯量特性受系统的控制参数、结构参数和稳态工作点共同影响。其中,对于控制参数而言,系统的惯量特性受下垂系数 D_p 和直流电压外环的比例系数 K_p 共同影响。在保持 D_p 不变的情况下,控制参数 K_p 对系统惯量特性的影响规律如图6所示,随着 K_p 的减小,网侧频率 f 的振荡幅度增大,变化速率增快,振荡周期变短。意味着系统的抗干扰能力减弱,易受外界影响,即系统的惯量特性减弱。

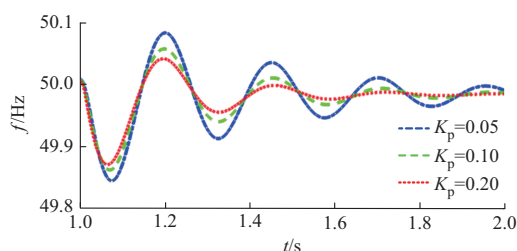


图6 控制参数 K_p 对系统惯量特性的影响
Fig. 6 Influence of control parameter K_p on system inertia characteristics

控制参数 K_p 对直流母线电压 U_{dc} 的影响规律如图7所示,随着 K_p 的增大, U_{dc} 的振荡幅度减小,变化速率减慢,振荡周期变长,系统的惯量特性增强。此外,控制参数 K_p 对电网频率 f 和直流母线电压 U_{dc} 的影响规律一致。

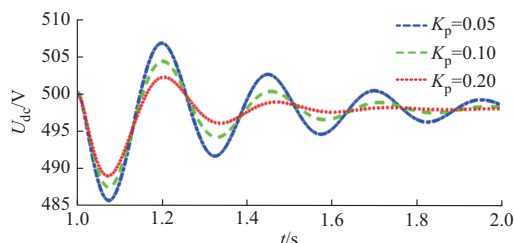


图7 控制参数 K_p 对系统直流母线电压 U_{dc} 的影响
Fig. 7 Influence of control parameter K_p on system DC bus voltage U_{dc}

对于结构参数而言,系统的惯量特性与直流母线电容 C 正相关。结构参数 C 对系统惯量特性的影响规律如附录B图B1所示,随着 C 的增加,网侧频率 f 的振荡幅度减小,变化速率减慢,振荡周期变长,恢复平衡的时间变长,抑制外界干扰的能力变强,意味着系统的惯性效应增强。

结构参数 C 对系统直流母线电压 U_{dc} 的影响如附录B图B2所示,随着直流母线电容 C 的增加, U_{dc} 的振荡幅度减小,振荡下降的速度减慢,同时振荡上升的速度也减慢,意味着系统的惯量增强,抑制外界干扰的能力变强。因此,增加直流母线电容 C 的容值,有利于提高系统的惯量效应。

对于稳态工作点参数而言,系统的惯量特性与直流母线电压的稳态工作点 U_{dc0} 正相关。稳态工作点参数 U_{dc0} 对系统惯量特性的影响规律如附录B图B3所示,随着 U_{dc0} 的增加,网侧频率 f 第一摆的下降速度减慢,同时上升速度也减慢,表明系统的惯量效应增强,抑制外界干扰的能力增强。

稳态工作点参数 U_{dc0} 对系统的直流母线电压 U_{dc} 的影响规律如附录B图B4所示,随着 U_{dc0} 的增加, U_{dc} 的振荡幅度明显减小,振荡衰减速度减小,表明系统的惯量特性增强。因此,可以通过增加 U_{dc0}

来提高系统的稳定性。

3.2 系统的阻尼特性验证

对于控制参数而言,系统的阻尼效应受下垂系数 D_p 、直流电压环的比例系数 K_p 和直流电压环的积分系数 K_i 共同影响。在 K_p 和 K_i 保持不变的情况下,控制参数 D_p 对系统阻尼特性的影响规律如附录B图B5所示,随着 D_p 的减小,网侧频率 f 的振荡幅度衰减明显减小,而振荡衰减的周期几乎不变,抑制振荡的能力增强,表明系统的阻尼效应增强。

控制参数 D_p 对系统直流母线电压 U_{dc} 的影响如附录B图B6所示,随着 D_p 的增加, U_{dc} 的振荡周期变化不明显,但振荡幅值的衰减速度明显减慢,即抑制振荡的能力减弱,系统的阻尼特性减弱。

系统的阻尼特性与等效电感 L 负相关,结构参数 L 对系统阻尼特性的影响规律如附录B图B7所示,随着 L 的减小,网侧频率 f 的振荡幅度减小,但振荡周期几乎不变,说明系统的阻尼特性增强。因此,可以通过减小等效电感 L 或系统与电网的安装距离来提高系统的阻尼特性。

结构参数 L 对系统直流母线电压 U_{dc} 的影响如附录B图B8所示,随着等效电感 L 的减小, U_{dc} 的振荡幅度明显减小,但振荡周期变化不明显,意味着系统的阻尼特性增强,抑制振荡的能力加强。

对于稳态工作点参数而言,系统的阻尼特性与蓄电池电压 U_b 正相关。稳态工作点参数 U_b 对系统阻尼特性的影响规律如附录B图B9所示,随着 U_b 的增大,网侧频率 f 的振荡幅度减小,但振荡周期几乎不变,表明系统抑制振荡的能力增强,即系统的阻尼能力增强。

稳态工作点参数 U_b 对系统直流母线电压 U_{dc} 的影响如附录B图B10所示, U_{dc} 的振荡幅度随着 U_b 的增加而减小,但振荡周期变化很小,意味着系统的阻尼特性增强。因此,可以通过提高蓄电池的电压等级来提高系统的阻尼能力。

3.3 系统的同步特性验证

对于控制参数而言,系统的同步特性只受直流电压环的积分系数 K_i 的影响。控制参数 K_i 对系统同步特性的影响规律如附录B图B11所示,随着 K_i 的增加,网侧频率 f 的振荡周期明显减小,而振荡幅值的变化微弱,系统的同步效应增强。

控制参数 K_i 对系统直流母线电压 U_{dc} 的影响如附录B图B12所示,随着 K_i 参数的增加, U_{dc} 的振荡周期发生明显变化,而振荡幅度以及衰减速度变化却不大,表明系统的同步效应增强。

对于稳态工作点参数而言,系统的同步特性与交流母线电压 U_g 正相关。稳态工作点参数 U_g 对系

统同步特性的影响规律如附录B图B13所示,随着 U_g 的增加,网侧频率 f 的振荡幅度变化不明显,但振荡周期明显缩短,表明系统的同步特性增强。

稳态工作点参数 U_g 对系统直流母线电压 U_{dc} 的影响如附录B图B14所示, U_{dc} 的振荡周期随着 U_g 的增加而减小,但振荡幅度几乎不变。因此,可以通过提高交流侧电压 U_g 来提高系统的同步特性。

4 实验验证

为了进一步验证分析结论的正确性,搭建半实物仿真平台,系统的参数与仿真参数保持一致,如附录B表B1所示。以光照强度作为扰动,通过半实物仿真平台验证加储能装置前后、不同控制参数和结构参数下交流侧频率 f 和直流母线电压 U_{dc} 的动态变化,反映系统的惯量阻尼特性。

在典型的控制策略下,保持控制参数和结构参数不变,图8(a)和(b)分别是给光伏系统加储能装置前后的 f 和 U_{dc} 的实验波形。可以看出,光伏加储能装置后, f 和 U_{dc} 的振荡幅度明显减小,而振荡周期明显变长,表明系统惯量效应增强。因此,给光伏配备储能也可以提高系统惯量支撑。

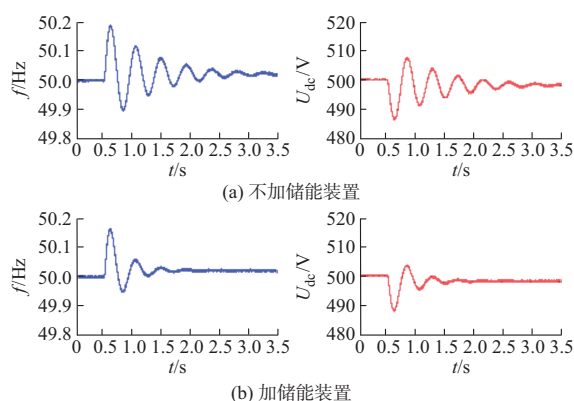


图8 加储能装置前后的 f 和 U_{dc} 的实验波形
Fig. 8 Experimental waveforms of f and U_{dc} before and after adding energy storage devices

在典型的光伏系统配置储能的情况下,保持 D_p 和 K_i 以及结构参数不变,附录C图C1(a)和(b)分别是不同直流电压外环比例系数 K_p 作用下 f 和 U_{dc} 的实验波形。可以看出,随着控制参数 K_p 的增加, f 和 U_{dc} 的振荡幅度明显减小,变化速率减慢,而振荡周期明显变长,表明系统惯量效应增强。

在典型的光伏系统配置储能的情况下,保持控制参数和结构参数 L 不变,附录C图C2(a)和(b)分别是不同直流母线电容 C 作用下 f 和 U_{dc} 的实验波形。可以看出,随着结构参数 C 的增加, f 和 U_{dc} 的振荡幅度明显减小,而振荡周期明显变长,意味着系统惯量效应增强。因此,增加直流母线电容 C 也可以

提高系统的惯量支撑。但不足的是,与小惯量的状态相比,大惯量的后期振荡幅度会增加,表明惯量不是越大越好。

在典型的光伏系统配置储能的情况下,保持 K_p 和 K_i 以及结构参数不变,附录C图C3(a)和(b)分别是不同下垂系数 D_p 作用下 f 和 U_{dc} 的实验波形。可以看出,随着控制参数 D_p 的增大, f 和 U_{dc} 的振荡幅度明显增大,而振荡周期几乎不变,表明系统阻尼特性减弱,抑制振荡的能力减弱。

在典型光伏系统配置储能的情况下,保持控制参数和结构参数 C 不变,附录C图C4(a)和(b)分别是不同等效电感 L 作用下 f 和 U_{dc} 的实验波形。可以看出,随着结构参数 L 的增加, f 和 U_{dc} 的振荡幅度明显增大,而振荡周期几乎不变,表明系统阻尼能力减弱。因此,可以通过减小线路阻抗或者安装距离来提高系统的阻尼特性。

在典型的光伏系统配置储能的情况下,保持 D_p 和 K_p 以及结构参数不变,附录C图C5(a)和(b)分别是不同直流电压环积分系数 K_i 作用下 f 和 U_{dc} 的实验波形。可以看出,随着控制参数 K_i 的增加, f 和 U_{dc} 的振荡幅度几乎不变,而振荡周期明显缩短,表明系统同步效应增强。

5 结语

光储一体化并网发电系统不仅能够实现光伏的MPPT控制,还具有响应电网动态的能力。本文针对系统惯量阻尼的问题,建立系统的直流电压时间尺度模型,借鉴电气转矩法从物理机制层面进行分析,得到如下结论。

1)常规控制策略下的光储一体化并网发电系统也具有一定的惯量阻尼效应,同时惯量阻尼特性受系统的控制参数、结构参数和稳态工作点参数共同影响。

2)从控制参数的角度来看,系统的惯性效应和同步特性分别受直流母线电压控制环中的比例控制器和积分控制器影响,而系统的阻尼能力主要受储能装置中的频率下垂控制影响。

3)从结构参数的角度来看,系统的动态特性受到线路阻抗 X 和直流母线电容 C 等参数影响。减小线路阻抗 X ,可以提高系统的惯量阻尼与同步特性;而直流母线电容 C 的容值越大,系统的惯量效应越强。

4)工作在MPPT模式下的光伏并网逆变器不具备惯量阻尼效应,只有工作在MPPT模式下的光伏额外配置储能装置并与电网频率耦合,才能有效地响应电网的频率动态。

以上结论可以作为光储一体化系统惯量阻尼设

计和控制的理论基础,使光储一体化并网发电系统更友好地接入电网,辅助提升电力系统的稳定性。值得注意的是,等效的惯量阻尼效应受控制参数、结构参数以及稳态工作点参数等多个因素的共同影响,如何协调这些参数为系统提供最优配置的惯量和阻尼是一个值得探讨的问题。此外,锁相环的动态也会影响系统的惯量阻尼特性,后续研究会着重考虑锁相环对系统的影响。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] 康重庆,姚良忠.高比例可再生能源电力系统的科学问题与理论研究框架[J].电力系统自动化,2017,41(9):1-11.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 1-11.
- [2] 姚良忠,朱凌志,周明,等.高比例可再生能源电力系统的协同优化运行技术展望[J].电力系统自动化,2017,41(9):36-43.
YAO Liangzhong, ZHU Lingzhi, ZHOU Ming, et al. Prospects of coordination and optimization for power systems with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 36-43.
- [3] 钟庆昌,王晓琳,曹鑫,等.新能源接入智能电网的逆变控制关键技术[M].北京:机械工业出版社,2016.
ZHONG Qingchang, WANG Xiaolin, CAO Xin, et al. Control of power inverters in renewable energy and smart grid integration [M]. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [4] WU Yongbin, ZHANG Donghui, XIONG Liansong, et al. Modeling and mechanism investigation of inertia and damping issues for grid-tied PV generation systems with droop control[J]. Energies, 2019, 12(10): 1985.
- [5] 钟庆昌.虚拟同步机与自主电力系统[J].中国电机工程学报, 2017,37(2):336-349.
ZHONG Qingchang. Virtual synchronous machine and autonomous power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 336-349.
- [6] TANCREDO BORGES C L, MARTINS V F. Multistage expansion planning for active distribution networks under demand and distributed generation uncertainties[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 36(1): 107-116.
- [7] 吕志鹏,盛万兴,钟庆昌,等.虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J].中国电机工程学报,2014,34(16):2591-2603.
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2591-2603.
- [8] 丁明,王伟胜,王秀丽,等.大规模光伏发电对电力系统影响综述[J].中国电机工程学报,2014,34(1):1-14.
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.
- [9] 张祥宇,杨黎,朱晓荣,等.光储发电系统的虚拟转动惯量控制[J].电力自动化设备,2017,37(9):109-115.
ZHANG Xiangyu, YANG Li, ZHU Xiaorong, et al. Virtual rotational inertia control of PV generation system with energy storage devices [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(9): 109-115.
- [10] 张兴,朱德斌,徐海珍.分布式发电中的虚拟同步发电机技术[J].电源学报,2012(3):1-6.
ZHANG Xing, ZHU Debin, XU Haizhen. Review of virtual synchronous generator technology in distributed generation [J]. Journal of Power Supply, 2012(3): 1-6.
- [11] ZHONG Qingchang, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [12] 吕志鹏,盛万兴,刘海涛,等.虚拟同步机技术在电力系统中的应用与挑战[J].中国电机工程学报,2017,37(2):349-360.
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, LIU Haitao, et al. Application and challenge of virtual synchronous machine technology in power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 349-360.
- [13] 王振雄,易皓,卓放,等.应用于光伏微网的一种虚拟同步发电机结构及其动态性能分析[J].中国电机工程学报,2017,37(2):444-454.
WANG Zhenxiong, YI Hao, ZHUO Fang, et al. A hardware structure of virtual synchronous generator in photovoltaic microgrid and its dynamic performance analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 444-454.
- [14] 张海峰,张兴,李明,等.基于变步长功率跟踪的有功备用式PV-VSG控制策略[J].电力系统自动化,2019,43(5):92-100. DOI:10.7500/AEPS20180720001.
ZHANG Haizheng, ZHANG Xing, LI Ming, et al. Control strategy of PV-VSG in active power reserve mode based on power tracking with variable step [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 92-100. DOI: 10.7500/AEPS 20180720001.
- [15] 马少康,耿华,杨耕,等.基于功率跟踪曲线切换的变速风电机组虚拟惯量控制[J].电力系统自动化,2018,42(17):42-51. DOI:10.7500/AEPS20170901004.
MA Shaokang, GENG Hua, YANG Geng, et al. Virtual inertia control of variable-speed wind turbines based on the switching of power point tracking curves [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 42-51. DOI: 10.7500/AEPS20170901004.
- [16] 熊连松,郭华,卓放.静止同步发电机模型及其在PWM并网逆变器动态特性与稳定性分析中的应用研究[C]//全国电能质量学术会议暨电能质量行业发展论坛,2015年8月21日,济南:20-40.
XIONG Liansong, GUO Hua, ZHUO Fang. Static synchronous generator model and its application in dynamic analysis and stability analysis of PWM grid-connected inverter [C]// National Power Quality Conference and Power Quality Industry Development Forum, August 21, 2015, Jinan, China: 20-40.
- [17] XIONG Liansong, ZHUO Fang, WANG Feng, et al. Static synchronous generator model: a new perspective to investigate dynamic characteristics and stability issues of grid-tied PWM inverter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(9): 6264-6280.
- [18] 修连成,熊连松,康志亮,等.运用下垂控制的并网储能系统惯

- 量阻尼特性分析[J].西安交通大学学报,2018,52(12):1-9.
- XIU Liancheng, XIONG Liansong, KANG Zhiliang, et al. Analysis for dynamic characteristics of grid-tied energy storage system with droop control [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(12): 1-9.
- [19] 修连成,刘娣,康志亮,等.基于功频下垂控制的并网型储能系统惯量与阻尼特性分析[J].电源学报,2018,16(4):35-42.
- XIU Liancheng, LIU Di, KANG Zhiliang, et al. Analysis of inertia and damping characteristics for grid-tied energy storage system based on power frequency droop control [J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(4): 35-42.
- [20] 奚鑫泽,耿华,杨耕.含主动轴系扭振阻尼的并网双馈风电场惯量控制方法[J].电工技术学报,2017,32(6):136-144.
- XI Xinze, GENG Hua, YANG Geng. Inertia control of the grid connected doubly fed induction generator based wind farm with drive-train torsion active damping [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 136-144.
- [21] 袁小明,程时杰,胡家兵.电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J].中国电机工程学报,2016,36(19):5145-5154.
- YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, HU Jiabing. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5145-5154.
- [22] 王成山.微电网分析与仿真理论[M].北京:科学出版社,2013:20-26.
- WANG Chengshan. Analysis and simulation theory of microgrid [M]. Beijing: Science Press, 2013: 20-26.
- [23] 张兴,曹仁贤.太阳能光伏并网发电及其逆变控制[M].北京:机械工业出版社,2011:143-146.
- ZHANG Xing, CAO Renxian. Solar photovoltaic grid-connected power generation and its inverter control [M]. Beijing: China Machine Press, 2011: 143-146.
- 吴永斌(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向:可再生能源并网发电系统的惯量阻尼与同步特性分析。E-mail: wuyongbin@sust.edu.cn
- 王素娥(1973—),女,通信作者,硕士,副教授,硕士生导师,主要研究方向:微电网与电能质量控制策略。E-mail: wangsue@sust.edu.cn
- 熊连松(1986—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向:逆变器动态分析与控制、可再生能源并网发电系统。E-mail: xiongliansong@163.com

(编辑 蔡静雯)

Analysis on Inertia and Damping Mechanism of Grid-connected Power Generation System Integrated with Photovoltaic and Energy Storage Systems

WU Yongbin¹, WANG Su'e¹, XIONG Liansong^{2,3}, ZHANG Donghui⁴, XU Zhao³

(1. School of Electrical and Control Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China;

2. School of Automation, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

3. Department of Electrical Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China;

4. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

Abstract: The grid-connected power generation system integrated with photovoltaic (PV) and energy storage systems (ESSs) is taken as the research object, and multiple time scales are used in the modeling ideas. Focusing on the main time scale affecting the dynamic characteristics of system frequency—the DC voltage time scale, this paper develops a dynamic model of DC voltage time scale for the analysis of the system inertia and damping characteristics. On the basis of this model, the electric torque analysis method is used to analyze the main factors and their action laws on the inertia effect, damping capacity and synchronization characteristics from the physical mechanism level. The research results show that the dynamic characteristics of the system are determined by its control parameters, structural parameters and steady-state operation point parameters. The inertia effect and synchronization characteristics of the system are respectively affected by the proportional controller and integral controller in the DC bus voltage control loop. The damping capacity of the system is mainly affected by the frequency droop control in the energy storage device. The system dynamic characteristics will not be affected by the PV converter operating in the maximum power point tracking (MPPT) mode. In addition, the system dynamic characteristics are also affected by the structural parameters (such as line impedance and DC bus capacitance), the steady-state operation point parameters (such as the AC/DC bus voltage level of the system) and the steady-state operation power (power angle). Finally, the correctness of the above analysis is verified by the simulation and experiment results.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51707091) and Shaanxi Provincial Industrial Science and Technology Research Project (No. 2015GY038).

Key words: grid-connected power generation system; photovoltaic (PV); energy storage system (ESS); DC voltage time scale; multi-time scale modeling; electrical torque analysis; inertia and damping characteristics

