

考虑锁相环影响的直流下垂控制电动汽车系统 并网动态特性分析

修连成¹,杜志叶¹,李明贤²,何靖莹¹,宋汉梁³,王东杰⁴

(1. 武汉大学 电气与自动化学院,湖北 武汉 430072;

2. 国网浙江省电力有限公司桐乡市供电公司,浙江 桐乡 314500;

3. 国网山东省电力公司滨州供电公司,山东 滨州 256600;

4. 国网江苏省电力有限公司超高压分公司,江苏 南京 211102)

摘要:随着新能源在电网中的渗透率不断增加,传统电力系统的惯性效应、阻尼水平以及同步能力都发生了改变,致使电网稳定运行能力下降。为此,基于静止同步发电机模型,建立了考虑锁相环影响的直流下垂控制两级式电动汽车(EV)系统的并网模型,揭示了EV系统惯性、阻尼以及同步特性的影响因素和影响规律,使得EV系统具备辅助电网稳定运行的能力。研究表明,变流器控制策略、锁相环、电路结构以及系统的稳态工作点共同决定了系统的动态特性。当EV系统使用直流下垂控制策略时,通过改变频率控制环、功率控制环、恒压控制环和锁相环参数,可等效调节系统的惯性效应、阻尼水平以及同步能力。同时,在强电网中调节锁相环参数对电网侧发生扰动时的动态特性具有改善作用,但对EV侧振荡的改善作用较小。所得结论可以辅助提升电力系统的安全运行能力,实现EV系统与电网的友好互动。

关键词:电动汽车;直流下垂控制;锁相环;动态特性;静止同步发电机模型

中图分类号:U 469.72;TM 761

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202202003

0 引言

近年来,为了缓解能源危机、改善环境问题,含有电力电子设备的新能源系统受到越来越多的关注。但随着新能源系统装机容量的增加,由惯量大、阻尼特性强的同步发电机主导的传统电网转变为惯量低、阻尼特性弱的新型电力系统,给电网的稳定运行带来了新的挑战^[1-3]。近十年来,随着电动汽车(EV)充放储一体化电站的建设,传统电网的源-荷框架更加模糊,导致电力系统在一定时间尺度内表现出更强的随机性、波动性^[4-5]。因此,现有的EV、光伏、风电等系统不仅需考虑自身的稳定性问题,还需承担一部分支撑电网稳定运行的责任,实现新能源系统与电网的友好互动^[6-9]。

含高比例电力电子设备的电力系统的动态分析涉及诸多变量。为了简化这一复杂问题,根据其时间尺度特征分为交流电流、直流电压以及机械转速时间尺度^[10]。其中,机械转速时间尺度与传统电力系统的机电时间尺度类似。文献[11]提出了一种联合运行模式,实现了依据调度指令在车网互动(V2G)和独立运行2种模式间的灵活选取;文献[12]基于下垂控制策略提出了一种用于储能系统的

主从控制策略,实现了并网和独立2种运行模式的无缝转换;基于拉格朗日乘法,文献[13]提出了一种模型预测电流控制算法,实现了高精度控制EV系统的输出电流;文献[14]在直流电压时间尺度下对比分析了下垂控制策略和虚拟同步发电机控制策略的异同点。但是,上述研究并没有深入分析影响系统动态特性的内在机制、主要参数及其影响规律,无法实现EV系统辅助提升电力系统安全稳定运行的目标。文献[15]利用传统的电气转矩分析法探究了锁相环(PLL)对单级并网变流器系统动态特性的影响,但未分析系统自身对动态特性的影响规律;文献[16]提出了一种计及个体差异性的EV系统参与电网调频的控制策略;文献[17]基于虚拟同步机控制策略提出了一种接入电网的EV充电控制策略,实现了EV系统与电网的友好交互。但是上述研究并没有完全考虑PLL对EV系统惯性效应、阻尼水平以及同步能力的影响。为了更好地分析并网变流器系统的稳定性问题,文献[18]根据电压源型并网变流器系统的特性,与常规旋转式同步发电机的电气转矩分析法进行类比,提出了一种静止同步发电机模型分析方法;文献[19]搭建了储能系统的动态模型,并利用静止同步发电机模型分析了储能系统惯量与阻尼的影响因素和影响规律;文献[20]聚焦于光储一体化并网发电系统的频率动态特性,从内部机制上分析了控制参数和结构参数对系统惯量与阻尼特性的影响。

本文以基于直流下垂控制的EV系统为研究对象,通过静止同步发电机模型分析了考虑PLL影响

收稿日期:2021-04-27;修回日期:2021-12-09

在线出版日期:2022-03-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51977152)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51977152)

的EV系统的惯性、阻尼以及同步特性。同时,从物理机制上阐述了影响系统动态特性的影响因素和影响规律,所得结论有助于利用EV系统辅助提升新型电力系统的稳定性。

1 EV系统并网电路与控制策略

EV系统的并网电路与控制策略如图1所示。图中: P_e 、 P_{ref} 分别为EV系统输出的电磁功率、额定功率; Q 为EV系统输出的无功功率; C 为直流电容; U_{dc} 、 U_{dcref} 分别为直流电容电压及其额定值; ω_{ref} 、 ω 分别为电网的额定角频率、实际角频率; U_{ga} 、 U_{gb} 、 U_{gc} 为并网点(PCC)处的三相电压; U_{psa} 、 U_{psb} 、 U_{psc} 为电网的三相电压; i_{sa} 、 i_{sb} 、 i_{sc} 为逆变器的三相输出电流; I_d 、 I_q 分别为逆变器输出电流的 d 、 q 轴分量; I_{dref} 、 I_{qref} 分别为 I_d 、 I_q 的额定值; I_e 、 U_e 分别为EV储能电池的输出电流、电压; I_{eref} 为 I_e 的参考值; R 、 L 分别为线路的等效电阻、等效电感; L_g 为电网的等效电感; P_{fre} 为EV系统的频率调节功率; I_{input} 、 I_c 、 I_{dc} 分别为直流电容的输入电流、充电电流、输出电流。EV系统的并网电路包括EV的储能电池、DC/DC电路、DC/AC电路以及电网,控制策略主要包括PLL检测策略和变流器控制策略。PLL检测策略使用单同步坐标系锁相环(SSRF-SPLL)检测PCC处电压,实现EV系统的相位跟踪和频率检测。变流器控制策略主要包括DC/DC电路和DC/AC电路的控制策略。

1.1 PLL控制原理

本文使用SSRF-SPLL进行电压相位跟踪,其控制框图如图2所示。图中: H 为虚拟惯量参数,用于实现PLL对系统的惯量控制; L_p 、 L_i 分别为PI控制环的比例、积分增益参数,PI控制环类似于环路低通滤波器; ω_{pi} 为调整角频率; f 为电网频率; U_d 、 U_q 分别为PCC处电压的 d 、 q 轴分量; U_{qref} 为 U_q 的额定值; δ' 为PCC和电网之间的电压相位差;Mod表示取余;

$abc/\alpha\beta$ 、 $\alpha\beta/dq$ 坐标变换为相位检测器。将 δ' 输入 $\alpha\beta/dq$ 坐标变换中,调整 U_q ,使其与额定值 U_{qref} ($U_{qref}=0$)相等,实现PCC处电压的 d 轴分量 U_d 与PCC处电压幅值 U_g 相等,即 $U_q=0$ 。此时,PLL锁定PCC处电压的同步相位和频率。所以,在电网电压三相对称的情形下,PLL可以实现对电压 q 轴分量的无静差跟踪。

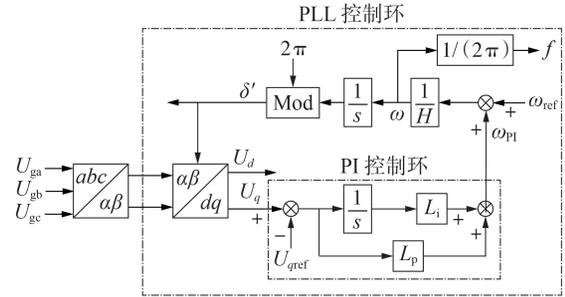


图2 SSRF-SPLL的控制框图

Fig.2 Control block diagram of SSRF-SPLL

由图2可得:

$$H\omega = (L_p + L_i/s)(U_q - U_{qref}) + \omega_{ref} \quad (1)$$

根据SSRF-SPLL的原理,选择PCC处电压的 q 轴分量为0的同步旋转坐标系, EV系统的矢量图见图3。图中, γ 为逆变器输出端电压与输出电流之间的相位差; I 为并网逆变器输出电流矢量,其幅值为 I ; U_g 为PCC处电压矢量; U_s 为逆变器输出端电压矢量,其幅值为 U_s ; U_{ps} 为电网电压矢量,其幅值为 U_{ps} ; φ 为电网电压与输出电流之间的相位差; $d_{(PLL)}$ 轴、 $q_{(PLL)}$ 轴为PLL的 dq 坐标轴; X_g 为电网的等效电抗; X 为PCC与电网间线路的等效感抗; δ 为逆变器输出端与PCC间的电压相位差。

根据图3可得:

$$U_q = IX_g \cos \gamma - U_{ps} \sin \delta' \quad (2)$$

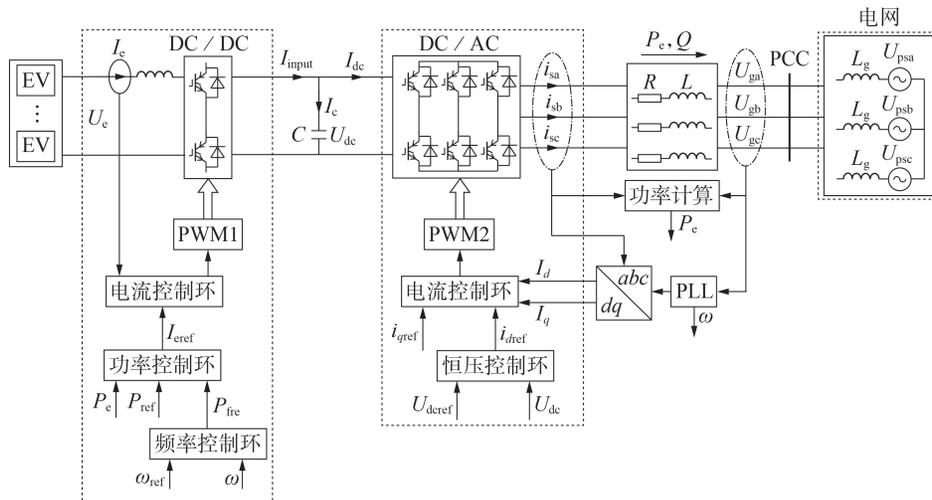


图1 EV系统的并网电路与控制策略

Fig.1 Grid-connected circuit and control strategy of EV system

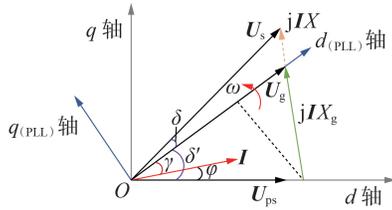


图 3 EV 系统矢量图

Fig.3 Vector graph of EV system

将式(2)代入式(1)并进行线性化后,可得:

$$H\Delta\omega = -L_p U_{ps} \cos \delta'_0 \Delta\delta' - (L_i/s) U_{ps} \cos \delta'_0 \Delta\delta' \quad (3)$$

式中: Δ 表示相应变量的增量;下标“0”表示稳态值。

当分析常规旋转式同步发电机的静态稳定性及失稳机制时,通常采用电气转矩分析法的二阶运动方程,如式(4)所示。

$$\begin{cases} s\Delta\delta = \Delta\omega \\ T_J s\Delta\omega = -T_D \Delta\omega - T_S \Delta\delta \end{cases} \quad (4)$$

式中: T_J 、 T_D 、 T_S 分别为等效惯性系数、阻尼系数、同步系数。

根据式(4)所示动态模型,可将式(3)改写为:

$$\begin{cases} s\Delta\delta' = \Delta\omega \\ Hs\Delta\omega = -L_p U_{ps} \cos \delta'_0 \Delta\omega - L_i U_{ps} \cos \delta'_0 \Delta\delta' \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可知,调节 PLL 参数就可等效改变 EV 系统的惯量效应、阻尼能力与同步特性。由图 2 可知,PLL 主要是根据 PCC 处电压来锁定相位和检测频率。当电网容量较大时,系统输出功率对 PCC 处影响较小。因此,在强电网中优化 PLL 参数对 EV 侧扰动引起的振荡并不具备调节动态特性的能力,但对电网侧扰动具有很好的改善作用。在弱电网中,PCC 处电压会随着 EV 系统输出功率的变化而发生变化。所以,在弱电网环境下改变 PLL 参数对 EV 侧和电网侧外部随机扰动引起的振荡都有较好的调节作用。

1.2 变流器控制策略

变流器控制框图如图 4 所示。图中, P_{sref} 为功率

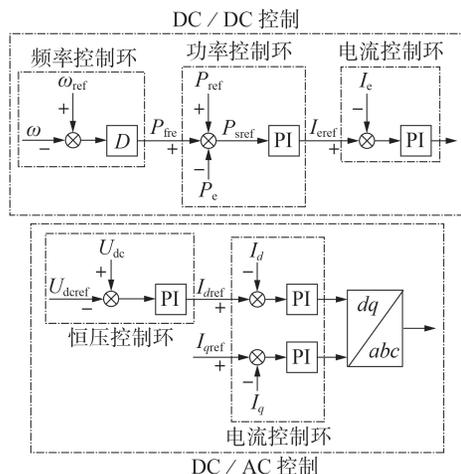


图 4 变流器控制框图

Fig.4 Control block diagram of converter

控制环的功率偏差; D 为频率控制环的下垂系数。考虑到本文研究的 EV 系统主要提供有功功率支撑,所以可以令 q 轴电流指令为 0。根据图 1,可得 EV 系统输出的电磁功率 P_e 为:

$$P_e = \frac{3}{2} \frac{U_s U_g}{X} \sin \delta \quad (6)$$

控制策略一般通过改变 δ 来实现调节系统输出的电磁功率 P_e 。本文主要是为了探究 EV 系统的动态特性,确保 EV 系统能够稳定支撑电网。根据图 4 可知, EV 系统的频率调节功率与电网角频率之间的关系可以表示为:

$$P_{fre} = D(\omega_{ref} - \omega) \quad (7)$$

为了更好地突显系统动态特性的变化规律,本文忽略了交流电流时间尺度的动态过程。由式(7)和图 4 可得:

$$I_e = (K_p + K_i/s) [P_{ref} + D(\omega_{ref} - \omega) - P_e] \quad (8)$$

式中: K_p 、 K_i 分别为功率控制环的比例、积分增益参数。

对于小干扰稳定性分析而言,一般仅考虑变量间的增量关系,所以对式(8)进行线性化后可得:

$$\Delta I_e = (K_p + K_i/s)(-D\Delta\omega - \Delta P_e) \quad (9)$$

由图 4 可知,DC / AC 控制策略采用恒定电压双闭环以维持直流电容电压稳定。恒压控制环中输出电流 d 轴分量与直流电容电压之间的关系为:

$$I_d = -(K_{pu} + K_{iu}/s)(U_{dcref} - U_{dc}) \quad (10)$$

式中: K_{pu} 、 K_{iu} 分别为恒压控制环的比例、积分增益参数。

2 EV 系统并网动态特性分析

根据图 1 中的直流电容电路可知,直流电容两端的电压与电流关系可表示为:

$$CdU_{dc}/dt = I_{input} - I_{dc} \quad (11)$$

直流侧额定电流 I_B 可以表示为:

$$I_B = S_B/U_{dcB} = P_B/U_{dcref} \quad (12)$$

式中: U_{dcB} 为直流侧的基准电压; S_B 为 EV 系统的容量; P_B 为 EV 系统的额定有功功率。

将式(11)等号两侧分别除以 I_B ,可得:

$$\frac{CU_{dcref}^2}{P_B} \frac{dU_{dc}^*}{dt} = I_{input}^* - I_{dc}^* = \frac{P_{input}^*}{U_{dc}^*} - \frac{P_e^*}{U_{dc}^*} \quad (13)$$

式中:“*”表示相应变量的标幺值; P_{input} 为 DC / DC 电路的输出功率。

由此可知,电压源型逆变器与常规旋转式同步发电机的特征方程和能量传递过程具有极强的相似性,因此类比于电气转矩分析法的二阶运动方程即可得到电压源型逆变器系统的静止同步发电机模型^[18]。由于变流器控制策略中恒压控制环的作用,直流电容电压 U_{dc} 的变化范围较小,故假设 $U_{dc}^* = 1$ p.u.。根据上述分析,标准形式的静止同步发电机

模型为:

$$\begin{cases} d\Delta\delta/dt = \Delta\omega \\ T_j d\Delta U_{dc}/dt = \Delta P_{input} - \Delta P_e \end{cases} \quad (14)$$

$$T_j = CU_{dcref}^2/P_B \quad (15)$$

DC/DC控制采用直流下垂控制模式,从物理本质上对应于传统发电系统的一次调频策略,其简化电路图见附录A图A1。

由于稳态时PCC处电压的 q 轴分量为0。因此,根据图1、式(6)以及式(10),可得:

$$I_d = \frac{U_s}{X} \sin \delta = -\left(K_{pu} + \frac{K_{iu}}{s}\right)(U_{dcref} - U_{dc}) \quad (16)$$

对式(16)进行线性化后可得:

$$\Delta\delta = \frac{1}{F} \left(K_{pu} + \frac{K_{iu}}{s}\right) \Delta U_{dc} \quad (17)$$

$$F = \frac{U_s}{X} \cos \delta_0 \quad (18)$$

将式(14)转化到复频域,并结合式(17),可得:

$$\begin{cases} s\Delta\delta = \Delta\omega \\ FT_j \frac{s\Delta\omega}{sK_{pu} + K_{iu}} = \Delta P_{input} - \Delta P_e \end{cases} \quad (19)$$

对式(6)进行线性化后,与式(9)和式(19)联立可得:

$$\begin{cases} s\Delta\delta = \Delta\omega \\ \frac{FT_j s\Delta\omega}{sK_{pu} + K_{iu}} = -U_e (D\Delta\omega + 1.5FU_g \Delta\delta) \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) - 1.5FU_g \Delta\delta \end{cases} \quad (20)$$

在电力系统的实际运行过程中,电网角频率变化不大,且频率变化率也较小,故式(20)中频率变化率的高次项是高阶无穷小量,可以忽略不计。将式(20)重新整理为标准模型,如式(21)所示。

$$\begin{cases} s\Delta\delta = \Delta\omega \\ [DU_e (K_p K_{iu} + K_{pu} K_i) + 1.5FU_g K_{pu} (U_e K_p + 1)] s\Delta\omega = -1.5FU_e U_g K_{iu} K_i \Delta\delta - \{DU_e K_{iu} K_i + 1.5FU_g [U_e (K_p K_{iu} + K_{pu} K_i) + K_{iu}]\} \Delta\omega \end{cases} \quad (21)$$

根据式(21)可知, EV系统的等效惯性系数、阻尼系数以及同步系数分别为:

$$\begin{cases} T_J = \frac{3U_s U_g \cos \delta_0 K_{pu} (U_e K_p + 1)}{2X} + DU_e (K_p K_{iu} + K_{pu} K_i) \\ T_D = DU_e K_{iu} K_i + \frac{3U_s U_g \cos \delta_0 [U_e (K_p K_{iu} + K_{pu} K_i) + K_{iu}]}{2X} \\ T_S = \frac{3U_s U_e U_g K_{iu} K_i \cos \delta_0}{2X} \end{cases} \quad (22)$$

根据式(5)和式(22)可知,变流器控制策略、PLL、电路结构及系统的稳态工作点都可以改变EV系统的动态特性。控制策略的影响因素主要包括频率控制环、功率控制环、恒压控制环及PLL的PI控制环参数和虚拟惯量参数 H ;电路结构主要包括直流

电容、电路阻抗、EV储能电池电压、电网电压等;系统的稳态工作点主要包括逆变器输出端和PCC之间的稳态电压相位差 δ_0 、PCC和电网之间的稳态电压相位差 δ'_0 、电容额定电压、逆变器输出端电压及PCC处电压等。显然,调整变流器控制策略和PLL是最经济且有效的方案。为了更好地发挥EV系统的有功支撑能力,需要根据实际情况调节系统的惯量、阻尼以及同步能力。

频率控制环、功率控制环、恒压控制环以及PLL参数对系统的动态特性具有显著影响。当恒压控制环的PI控制器参数增大时,增强了EV系统对随机干扰的抵御作用,提升了系统的惯性水平。对于系统的同步特性,变流器控制策略中的功率控制环和恒压控制环的积分增益参数都可以进行等效调节。PLL参数对系统动态特性的调节效果与扰动位置、扰动类型以及电网容量有直接关系,而变流器控制策略参数则可以在不同的情况下改变EV系统的惯性、阻尼以及同步特性。根据式(5)和式(22)可知,变流器控制策略和PLL参数对EV系统的惯量、阻尼以及同步特性的影响规律如表1所示。

表1 各参数对EV系统的影响规律

Table 1 Influence law of each parameter on EV system

影响参数	强电网下 EV侧扰动		强电网下 电网侧扰动			弱电网下 EV侧扰动			弱电网下 电网侧扰动			
	T_J	T_D	T_J	T_D	T_S	T_J	T_D	T_S	T_J	T_D	T_S	
	L_p	×	×	×	×	√	×	×	√	×	×	√
L_i	×	×	×	×	×	√	×	×	√	×	×	√
H	×	×	×	√	×	×	√	×	×	√	×	×
D	√	√	×	√	√	×	√	√	×	√	√	×
K_{pu}	√	√	×	√	√	×	√	√	×	√	√	×
K_{iu}	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
K_p	√	√	×	√	√	×	√	√	×	√	√	×
K_i	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√

注:“√”、“×”分别表示不同扰动条件下影响参数对 T_J 、 T_D 、 T_S 有、无明显改善效果。

由表1可知:在强电网环境下,变流器控制策略、电路结构以及系统的稳态工作点对EV侧和电网侧的外部扰动都具备很好的动态特性调节能力,而PLL参数仅对电网侧的外部扰动有很好的抵御作用;当EV系统接入弱电网时,调节变流器控制策略参数、PLL参数、电路结构以及系统的稳态工作点可以等效改变系统的惯量效应、阻尼能力以及同步特性。由图4可知,频率控制环的下垂系数 D 只有在发生引起系统频率变化的扰动时,才能对系统的惯量效应和阻尼水平进行调节。

频率控制环的下垂系数 D 以及逆变器输出端和PCC之间的稳态电压相位差 δ_0 对系统惯量的影响规律如附录A图A2所示。由图可知,频率控制环的下

垂系数 D 越大, DC / DC 电路的输出功率与电网频率之间的耦合越强,对电网输出的电磁功率越大,对电网的支撑作用越强,从而实现了对系统惯性特性的调节作用。稳态电压相位差 δ_0 对系统惯量的影响较大,但是稳态电压相位差的静态工作点需要根据系统的稳定裕度与容量利用率进行合理选择。由表 1 可知,恒压控制环可以等效改变 EV 系统的阻尼特性,其影响规律如附录 A 图 A3 所示。由图可知,随着恒压控制环比例和积分增益参数的增大, EV 系统的抗扰动能力增强,系统的阻尼能力也得到了增强。显然, EV 系统的惯性、阻尼以及同步动态特性受多个变流器控制策略参数以及 PLL 参数的共同作用。

3 仿真验证与分析

本文基于 MATLAB / Simulink 仿真软件搭建了图 1 所示的 EV 系统并网电路以验证上述理论分析的准确性。仿真参数如附录 A 表 A1 所示。假设本文模型在 0.2 s 时发生扰动,验证不同变流器控制策略参数和 PLL 参数对系统惯性、阻尼以及同步特性的影响规律和影响效果。

3.1 惯性效应验证与分析

EV 系统的惯量水平受系统的变流器控制策略、PLL、电路结构、系统稳态工作点的共同影响。在控制策略中频率控制环、功率控制环、恒压控制环及 PLL 的虚拟惯量参数都可等效调节 EV 系统的惯量水平。

当 EV 侧发生功率扰动时,恒压控制环的比例增益参数 K_{pu} 对 EV 系统抵御外界扰动能力的影响规律如图 5 所示。由图可知:随着 K_{pu} 减小,直流电容电压 U_{dc} 的振荡幅值逐渐增大, EV 系统对外部扰动的抵御能力减弱; K_{pu} 不但影响惯性水平,而且会影响系统的阻尼效应, K_{pu} 越大,则 EV 系统的惯性水平越强,而惯性水平的高低决定了随机扰动影响下 U_{dc} 的振荡幅值,从而导致系统输出功率发生振荡情况。仿真结果与式(22)所得理论分析结果一致。

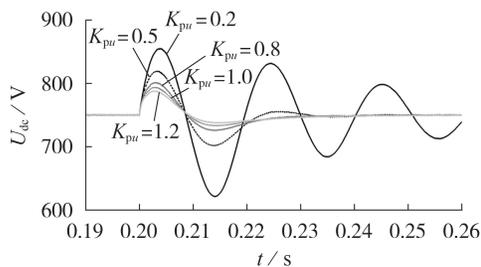


图5 K_{pu} 对 EV 系统的影响规律
Fig.5 Influence law of K_{pu} on EV system

当电网侧发生相位扰动时, PLL 的虚拟惯量参数 H 变化对 EV 系统惯量效应的影响规律如附录 A 图 A4 所示。由图可知:随着 H 增大,直流电容电压

U_{dc} 的振荡时间和幅值逐渐减小, EV 系统对随机扰动的缓冲作用增加。因此, PLL 的虚拟惯量参数 H 越小,则 EV 系统的惯量水平越弱。仿真结果与式(5)所得理论分析结果一致。

3.2 阻尼水平验证与分析

由表 1 可知,控制策略中频率控制环、功率控制环、恒压控制环以及 PLL 的比例增益参数是影响阻尼特性的主要因素。当 EV 侧发生功率扰动时,功率控制环的比例增益参数 K_p 对 EV 系统的影响规律如图 6 所示。由图可知:随着 K_p 的增大,直流电容电压 U_{dc} 的振荡幅值逐渐减小且衰减速度变快,系统的阻尼水平逐渐增加; K_p 也会对系统的惯性系数产生影响,但仍可以显著观察到 K_p 越大, EV 系统对 U_{dc} 振荡的阻尼水平越强。

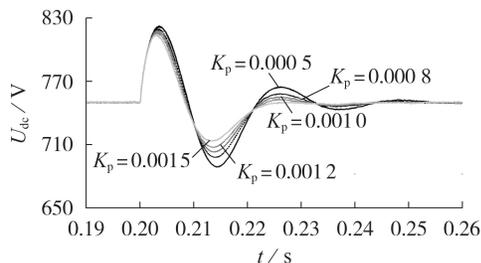


图6 K_p 对 EV 系统的影响规律
Fig.6 Influence law of K_p on EV system

当电网侧发生相位扰动时, PLL 的比例增益参数 L_p 对系统阻尼特性的影响规律如附录 A 图 A5 所示。由图可知,随着 L_p 增大,直流电容电压 U_{dc} 的振荡幅值明显减小,系统的阻尼特性增强。仿真结果与式(5)所得理论分析结果一致。

3.3 同步特性验证与分析

通过改变功率控制环、恒压控制环及 PLL 的积分增益参数即可等效调节系统的同步特性。当 EV 侧发生功率扰动时,调节恒压控制环的积分增益参数 K_{iu} , 其对 EV 系统同步特性的影响规律见图 7。由图可知,随着 K_{iu} 减小,直流电容电压 U_{dc} 的振荡时间变长, EV 系统对外部扰动的同步能力减弱。虽然 K_{iu} 取值对系统的惯性、阻尼、同步特性都具有一定的影响,但仍能显著观察到恒压控制环的积分增益参数 K_{iu}

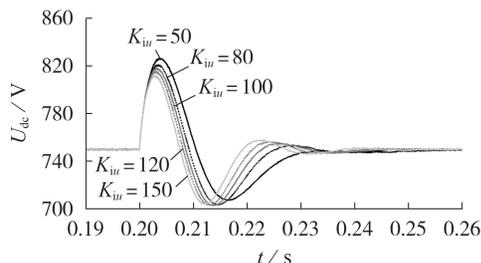


图7 K_{iu} 对 EV 系统的影响规律
Fig.7 Influence law of K_{iu} on EV system

越大, EV系统的同步特性越强, U_{dc} 能更快速地到达稳定运行点。仿真结果与上述理论分析结果一致。

综上所述, 变流器控制策略、PLL、电路结构以及系统的稳态工作点对系统动态特性的影响不同, 但由于正向动态特性的作用, EV系统都能回归到稳定工作点附近。在新型电力系统中, 不同控制参数的选取需要根据实际的电网需求进行设计。因此, 惯量、阻尼以及同步特性控制参数的设计首先需要明确电力系统对惯量、阻尼和同步的需求量, 然后基于此设计EV系统的控制策略参数。

4 结论

本文通过构建直流下垂控制两级式EV系统模型, 阐述了变流器控制策略、PLL、电路结构以及稳态工作点对EV系统惯性、阻尼以及同步特性的影响规律, 所得结论如下。

1) 变流器控制策略、PLL、电路结构以及系统的稳态工作点共同决定了直流下垂控制的EV系统的惯量效应、阻尼能力以及同步特性。通过改变EV系统控制策略中频率控制环、功率控制环、恒压控制环以及PLL参数即可等效调节EV系统的动态特性, 其效果类似于改变电路结构和系统的稳态工作点。

2) 在强电网环境下调节PLL参数无法显著提升系统对EV侧随机扰动的抵御能力, 而调节变流器控制策略参数可以在不同情况下改变EV系统的动态特性。当扰动引起PLL检测的频率发生变化时, 频率控制环的下垂系数才能对系统的惯量效应和阻尼水平进行调节。

3) 优化设计EV系统的变流器控制策略参数和PLL参数以等效改变系统的惯量效应、阻尼能力和同步特性是一种成本低且能有效调节系统动态特性的方法。

本文的研究结论有助于设计EV系统的并网控制策略, 提升电力系统的安全、稳定运行能力。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 文云峰, 杨伟峰, 林晓煌. 低惯量电力系统频率稳定分析与控制研究综述及展望[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 211-222.
WEN Yunfeng, YANG Weifeng, LIN Xiaohuang. Review and prospect of frequency stability analysis and control of low-inertia power systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 211-222.
- [2] 熊连松, 修连成, 王慧敏, 等. 储能系统抑制电网功率振荡的机理研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(20): 4373-4380.
XIONG Liansong, XIU Liancheng, WANG Huimin, et al. Mechanism of energy storage system to suppress grid power oscillations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(20): 4373-4380.
- [3] 原凯, 宋毅, 李敬如, 等. 分布式电源与电动汽车接入的谐波特

征研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(增刊1): 53-57.

YUAN Kai, SONG Yi, LI Jingru, et al. Harmonic characteristics of distributed generation and electric vehicle supplying access to the grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(Supplement 1): 53-57.

- [4] 吕耀棠, 管霖, 赵琦, 等. 充电式电动汽车停车场的V2G模型及接入配电网方案优化研究[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 1-7, 14.
LÜ Yaotang, GUAN Lin, ZHAO Qi, et al. Research on V2G model of EPVV and its optimal scheme accessing to distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 1-7, 14.
- [5] 高赐威, 张亮. 电动汽车充电对电网影响的综述[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 127-131.
GAO Ciwei, ZHANG Liang. A survey of influence of electric vehicle charging on power grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 127-131.
- [6] 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, 86.
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, 86.
- [7] ALIPOOR J, MIURA Y, ISE T. Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(2): 451-458.
- [8] 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): 112-120.
XIU Liancheng, XIONG Liansong, KANG Zhiliang, et al. Analysis on dynamic characteristics of grid-tied energy storage system with droop control[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(12): 112-120.
- [9] 符杨, 孟祥浩, 苏向敬, 等. 考虑逆变器无功支撑和三相选择的平衡主动配电网电动汽车有序充电控制[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(12): 1-12.
FU Yang, MENG Xianghao, SU Xiangjing, et al. Coordinated charging control of PEV considering inverter's reactive power support and three phase switching in unbalanced active distribution networks[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12): 1-12.
- [10] 胡家兵, 袁小明, 程时杰. 电力电子并网装备多尺度切换控制与电力电子化电力系统多尺度暂态问题[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5457-5467, 5594.
HU Jiabing, YUAN Xiaoming, CHENG Shijie. Multi-time scale transients in power-electronized power systems considering multi-time scale switching control schemes of power electronics apparatus[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5457-5467, 5594.
- [11] 蔡久青, 陈昌松, 段善旭, 等. 一体化电站并联功率变换系统多模式运行统一控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 92-100.
CAI Jiuqing, CHEN Changsong, DUAN Shanxu, et al. Unified control of multimode operation for paralleled power conversion system in integrative station[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 92-100.
- [12] VARGAS-SERRANO A, SÁEZ D, REYES L, et al. Design and experimental validation of a dual mode VSI control system for a micro-grid with multiple generators[C]//IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Montreal, QC, Canada: IEEE, 2012: 5631-5636.

- [13] 谢鹰,钱科军,於锋,等. 电动汽车用V2G并网逆变器改进型MPC算法研究[J/OL]. 电源学报. (2020-11-09)[2021-02-27]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20201106.1400.002.html>.
- [14] D'ARCO S, SUUL J A. Equivalence of virtual synchronous machines and frequency-droops for converter-based MicroGrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1): 394-395.
- [15] TAN S L, GENG H, YANG G. Phillips-Heffron model for current-controlled power electronic generation unit [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(3): 582-594.
- [16] 孙杰,赵国瑾,刘顺桂,等. 基于改进时间延迟环节的集群电动汽车参与电网调频的动态特性研究[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 470-480.
SUN Jie, ZHAO Guojin, LIU Shungui, et al. Research on dynamic characteristics of electric vehicles participating in frequency regulation of power system based on improved time delay [J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 470-480.
- [17] 刘其辉, 逯胜建. 参与微电网调频的电动汽车虚拟同步机充放电控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 171-179.
LIU Qihui, LU Shengjian. Charging and discharging control strategy based on virtual synchronous machine for electrical vehicles participating in frequency regulation of microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 171-179.
- [18] XIONG L S, ZHUO F, WANG F, 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.
- [19] 修连成. 储能系统改善电网惯量阻尼特性的机理与方法研究 [D]. 成都: 四川农业大学, 2019.
XIU Liancheng. Research on mechanism and method of energy storage system to improve power system inertia damping characteristics [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2019.
- [20] 吴永斌, 王素娥, 熊连松, 等. 光储一体化并网发电系统的惯量阻尼机理分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(6): 129-137.
WU Yongbin, WANG Su'e, XIONG Liansong, et al. Analysis on inertia and damping mechanism of grid-connected power generation system integrated with photovoltaic and energy storage systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(6): 129-137.

作者简介:



修连成

修连成(1992—),男,博士研究生,主要研究方向为新型电力系统稳定性、电磁环境、智能电气设备等(E-mail: xiuliancheng@163.com);

杜志叶(1974—),男,教授,博士,主要研究方向为智能电气设备、特高压直流输电关键技术、电磁多物理场耦合计算技术等(E-mail: Duzhiye@126.com);

李明贤(1994—),男,助理工程师,硕士,主要研究方向为电力电子化电力系统、电能质量等;

何靖莹(1999—),女,硕士研究生,主要研究方向为新型电力系统稳定性、智能电气设备等。

(编辑 陆丹)

Dynamic characteristic analysis of DC droop control-based grid-connected electric vehicle system considering influence of phase locked loop

XIU Liancheng¹, DU Zhiye¹, LI Mingxian², HE Jingxuan¹, SONG Hanliang³, WANG Dongjie⁴

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Tongxiang Power Supply Company of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Tongxiang 314500, China;

3. Binzhou Power Supply Company of State Grid Shandong Electric Power Company, Binzhou 256600, China;

4. State Grid Jiangsu EHV Company, Nanjing 211102, China)

Abstract: With the increasing penetration rate of new energy in the power grid, the inertia effect, damping level and synchronization capability of the traditional power system have changed, resulting in the decline of power grid's stable operation capability. Therefore, based on the model of static synchronous generator, the grid-connected model of DC droop control-based two-stage EV (Electric Vehicle) system considering the influence of PLL (Phase Locked Loop) is established, and the influencing factors and laws of EV system's inertia, damping and synchronization characteristics are revealed, which makes the EV system capable of assisting the stable operation of power grid. The research results show that the system's dynamic characteristics are determined by the control strategy of converter, PLL, circuit structure and steady-state operation point of the system. When DC droop control strategy is used in EV system, the inertia effect, damping level and synchronization capability of the system can be effectively adjusted by changing the parameters of frequency control loop, power control loop, constant voltage control loop and PLL. At the same time, adjusting PLL parameters in strong power grid can improve the dynamic characteristics when disturbance occurs at power grid side, but the improvement effect on the oscillation at EV side is small. The conclusion can help improve the safe operation ability of power system and realize the friendly interaction between EV system and power grid.

Key words: electric vehicles; DC droop control; phase locked loops; dynamic characteristics; model of static synchronous generator

附录 A

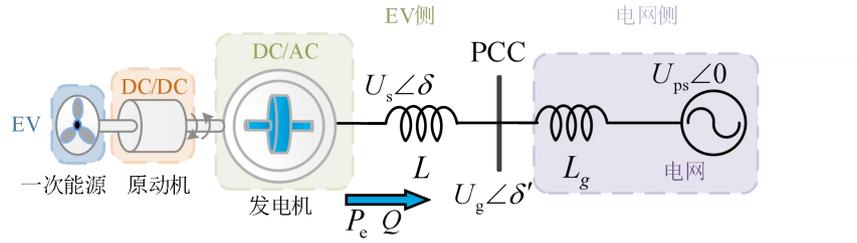


图 A1 简化电路图
Fig.A1 Simplified circuit diagram

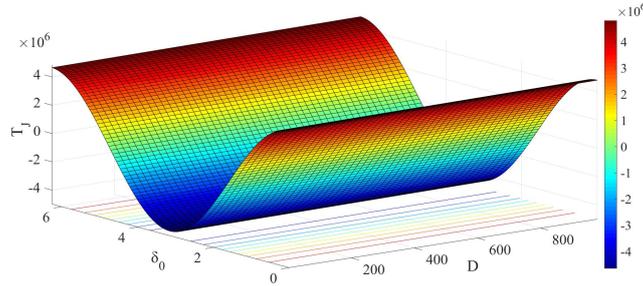


图 A2 D 和 δ_0 对系统惯量的影响规律
Fig.A2 Influence rule of D and δ_0 on system inertia

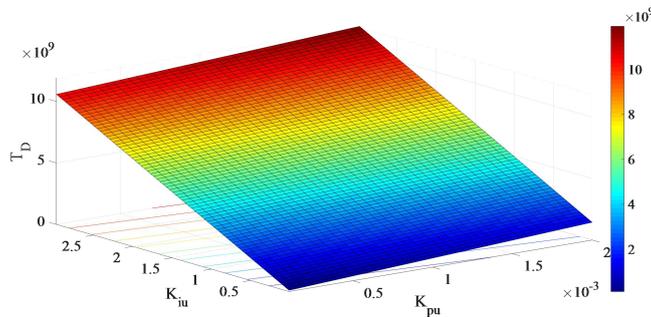


图 A3 恒压控制环参数对系统阻尼的影响规律
Fig.A3 Influence rule of constant voltage loop parameters on system damping

表 A1 EV 系统的仿真参数
Table A1 Simulation parameters of EV system

参数	数值
直流电容电压/V	750
电网线电压/V	380
直流侧电容/mF	1
直流侧电感/mH	0.5
DC/AC 电路开关频率/kHz	10
交流侧电感/mH	2
DC/DC 电路开关频率/kHz	20

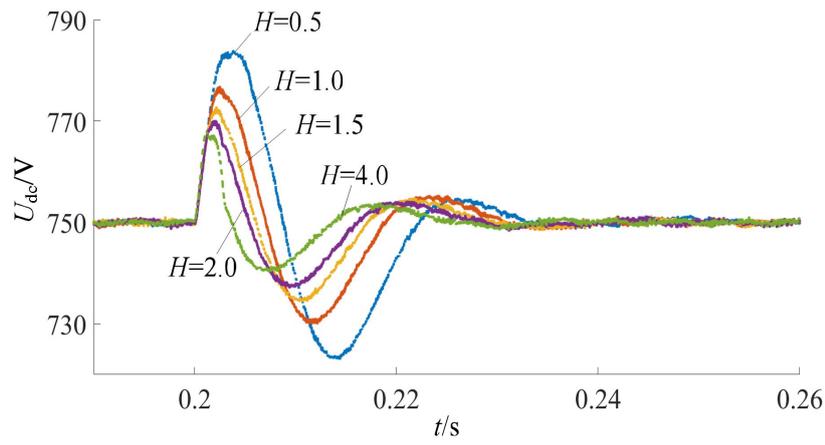


图 A4 H 对 EV 系统的影响规律
Fig.A4 Influence rule of H on EV system

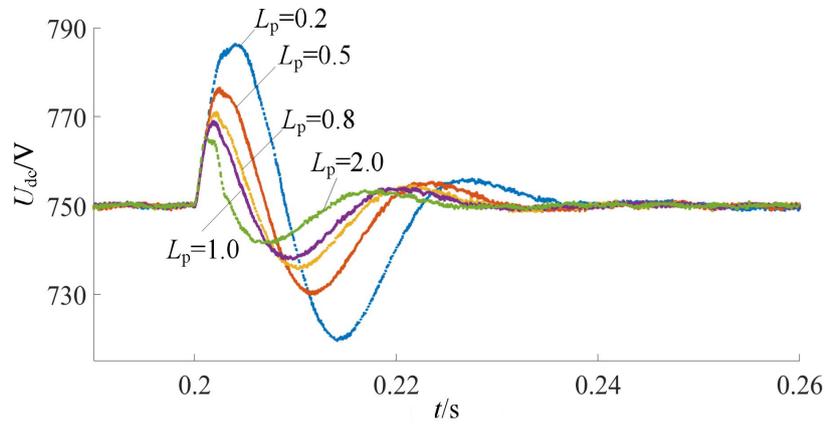


图 A5 L_p 对 EV 系统的影响规律
Fig.A5 Influence rule of L_p on EV system