

光伏发电系统抑制电网功率振荡的机理研究

林健,王悦,张仪,查雨欣

(南京工程学院 电力工程学院,江苏 南京 211167)

摘要:为了探究光伏发电系统(PVS)抑制电网功率振荡的物理机理及控制策略,利用PVS的快速响应特性,首先在机电时间尺度下建立了PVS接入无穷大电网的数学模型。然后,借助电气转矩分析法,对同步发电系统的惯量、同步以及阻尼特性进行了机理探究。研究表明:在PVS利用转速作为外环反馈信号的控制策略下,转速控制环的比例、积分、微分(PID)参数分别等效地改变同步机系统的等效阻尼系数、同步系数、惯性系数。最后,通过Matlab仿真验证,所得结果与上述机理研究结果一致。

关键词:光伏发电系统;电网功率振荡;惯性;同步;阻尼

中图分类号:TM464 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd21365

Research on Mechanism of Photovoltaic System Suppressing Grid Power Oscillation

LIN Jian, WANG Yue, ZHANG Yi, ZHA Yuxin

(School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, Jiangsu, China)

Abstract: In order to explore the physical mechanism and control strategy of photovoltaic system (PVS) to suppress grid power oscillation, the fast response characteristics of PVS were used firstly to establish the mathematical model of PVS access to the infinite grid at the electromechanical time scale. Then, based on the electrical torque analysis method, the mechanism of the inertia, synchronization and damping characteristics of the synchronous power generation system were explored. The research results show that under the control strategy which the speed was used as the external loop feedback signal in the PVS, the proportion, integration and differentiation (PID) parameters of the speed control loop could respectively change the equivalent damping coefficient, synchronization coefficient and inertia coefficient of the synchronous machine system. Finally, the Matlab simulation results are consistent with the above-mentioned mechanism research results.

Key words: photovoltaic system (PVS); grid power oscillation; inertia; synchronization; damping

当今新能源在世界能源战略中正发挥着越来越重要的作用。但是,伴随着它接入电网比重的不断提高,所带来的问题也逐步增多。电网的功率振荡便是这诸多问题里最不容小觑的一个。功率振荡是指当传输线等效阻抗很小或为负值时发生的电网功率波动。严重的功率振荡会导致电力系统解列,直接威胁电网的安全^[1-3]。

目前,最常用来抑制电网功率振荡的方式是电力系统稳定器(power system stability, PSS)。PSS通过控制同步发电机的励磁来改善系统的振荡阻尼能力,在抑制低频振荡方面具有显著效果,但随着社会的发展,电力系统的工况越来越

复杂,它在更低频及超低频上的作用就显得有些乏力了^[4-5]。近些年,国内外很多学者开始将柔性交流输电系统(flexible AC transmission system, FACTS)加入到抑制电网振荡的环节中,利用FACTS装置快速响应的特点,通过无功和有功两种技术途径对系统的功率振荡进行抑制,均取得了不错的效果。在无功抑制方面,文献[6]利用了静止同步补偿器(STATCOM)的控制特性,在系统中采用双环控制,验证了STATCOM参与抑制电网振荡的合理性。进一步,文献[7]分析了STATCOM抑制电网功率振荡的物理机理,从惯量、阻尼、同步效应的角度探究了不同控制模式下影响

基金项目:国家自然科学基金项目(51707091);南京工程学院校级基金创新基金面上项目(CKJB201702)

作者简介:林健(1971—),男,工学硕士,教授,Email:591928389@qq.com

振荡抑制效果的作用规律,使其输出无功功率,间接实现了抑制电网功率振荡。文献[8-11]则在此基础上,分别在光伏、风电合适的安装位置上加装静止无功发生器、静止同步串联补偿器等无功补偿装置,在抑制电网功率振荡方面取得了不错的成果。

上述的无功抑制策略固然取得了一定的效果,但是对于同步机转子动态过程来说,只是通过对电网电压的调节来间接调整有功,所以作用范围和抑制能力都比较受限制^[12]。相反,有功抑制策略就显得更为直接有效。文献[13]利用储能装置强大的有功支撑,使它输出足够多的有功功率来抑制振荡,具有良好的技术潜能。但是,在电网的装机容量较大、需要储能提供的有功支撑足够多时,储能装置的安装容量也必然更大,所以这种情况下的有功抑制则显得经济性非常低、且目前较难以实现。此时,风电、光伏这类可再生能源就显现出了它们强大的优势。但是,考虑到风力发电通常都需要采用巨大的叶片、机械转轴等结构,并且一旦出现故障,所耗费的维修成本将不可估量。这时,结构简单、成本合理以及维修便捷的光伏对比风电就显得优势尤为突出^[14-16]。在此前提下,文献[17]以大规模光伏并网系统为研究对象,分别从系统阻尼、有功功率控制等角度揭示了大型光伏电站和电网之间的并网机理,为光伏抑制电网功率振荡打下了理论基础。

目前,国内外基于光伏发电系统抑制电网功率振荡还停留在对控制策略的研究上^[18-20],少有文献涉及到物理机理的探究。但是,对于振荡过程(机电暂态过程)而言,系统的网络拓扑和参数、动态元件的特性、运行方式、控制策略以及控制器参数这些都是不容忽视的因素^[21-23]。所以,本文借助电气转矩分析法,以具有备用的光伏发电系统为平台,采用有功控制模式来分析PVS抑制电网功率振荡的机理。

1 PVS抑制电网振荡物理模型

为了阐述PVS和同步机电网间相互作用的动态机理,更好地达到抑制电网振荡的作用,本文选择使用留有备用的光伏发电装置,并且在输电线的中心位置将PVS接入到电网中去,方便探究同步机电网的惯量、阻尼以及同步特性。

图1为PVS接入电网的等值模型示意图。如图1所示,本系统由同步发电机、传输线路、电网

以及包含光伏逆变器和电池板的PVS所构成。原动机的机械功率由 P_m 表示;发电机的电磁功率由 P_e 表示;三条线路的等效阻抗分别由 Z_0, Z_1, Z_2 表示。

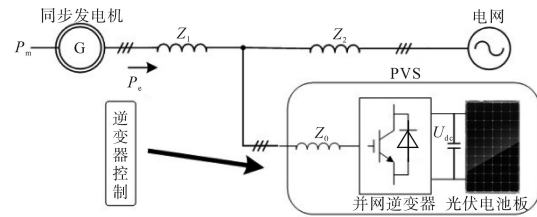


图1 PVS接入电网的等值模型

Fig.1 Equivalent model of PVS connected to power grid

当系统稳定运行时,同步机转轴的输入、输出功率达到平衡,电网频率可保持稳定;当电网出现扰动导致功率不平衡时,由于同步机惯性较大,因此系统受扰之后的振荡周期也较长。此时,PVS利用同步机的反馈信号,向系统传递可变的有功功率,从而改变同步机的电磁功率,使系统更快地恢复到稳定状态。

考虑到机电时间下的功率振荡和电磁时间下的光伏逆变器动态过程分别处在不同的时间尺度上^[13],并且差距较大,所以图1中的PVS可以用一个有功电流源表示。图2为图1的系统简化图,其中, X, X_1 为线路等效电抗; k 为 X 和 X_1 之间系数; I_a, I_b 分别为发电机侧和电网侧的电流源; I_d 为光伏发电系统向电网注入的有功电流; E, V, U 分别为同步机电动势、节点电压以及网侧电动势; δ, β 分别为 E 和 U 的相应相位角。

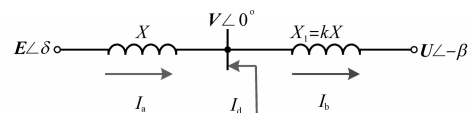


图2 机电时间尺度下的系统简化图

Fig.2 System simplified diagram at electromechanical time scale

在图2的基础上,作出等值系统的电压向量图如图3所示,并且假设 $E=U$ 。

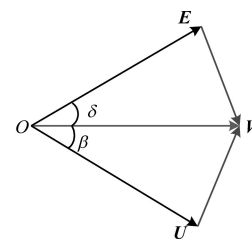


图3 等值系统的电压向量图

Fig.3 Voltage vector diagram of the equivalent system

当系统正常运行时,PVS通过向电网注入或吸收有功功率来抑制功率振荡。如图2所示,同步发电机输出的电磁功率可表示为

$$P_e = \frac{EV}{X} \sin\delta \quad (1)$$

电网吸收的有功功率为

$$P_\infty = VU \sin\beta / (kX) \quad (2)$$

根据系统有功功率守恒原理可得:

$$EV/X\sin\delta - I_d V \cos 0^\circ = UV \sin\beta / (kX) \quad (3)$$

将式(3)简化得:

$$\sin\delta = \frac{U}{kE} \sin\beta + \frac{X}{E} I_d \quad (4)$$

根据基尔霍夫电流定律可得:

$$\frac{E\angle\delta - V\angle 0^\circ}{jX} + I_d \angle 0^\circ = \frac{V\angle 0^\circ - U\angle(-\beta)}{jkX} \quad (5)$$

式(5)可重新改写为

$$kE\cos\delta - kV = V - U \cos\beta \quad (6)$$

$$kE\sin\delta + kXI_d = U \sin\beta \quad (7)$$

联立式(6)、式(7)可得:

$$[V(1+k) - kE \cos\delta]^2 + (kE\sin\delta + kXI_d)^2 = U^2 \quad (8)$$

将式(8)线性化可得:

$$\frac{(1+k)\Delta V + kE\sin\delta_0 \Delta\delta}{kE\sin\delta_0 + kXI_{d0}} = \frac{kE\cos\delta_0 \Delta\delta + kX\Delta I_d}{kE\cos\delta_0 - V_0(1+k)} \quad (9)$$

式中: δ_0 为系统额定相位角; I_{d0} 为PVS的额定输出电流; V_0 为网点额定电压初始值。

由图2的物理意义可知,当PVS向电网注入的有功电流 I_d 或者同步发电机的功角 δ 变化时,PVS接入电网点电压 V 也会随之发生改变。由此,式(9)可变化为

$$\Delta V = -\frac{kEV_0(1+k)\sin\delta_0 + k^2EXI_{d0}\cos\delta_0}{V_0(1+k)^2 - kE(1+k)\cos\delta_0} \Delta\delta - \frac{k^2X^2I_{d0} + k^2EX\sin\delta_0}{V_0(1+k)^2 - kE(1+k)\cos\delta_0} \Delta I_d \quad (10)$$

将式(10)代入线性化后的式(1)可得:

$$\begin{aligned} \Delta P_e &= \frac{EV_0}{X} \sin\delta_0 \cdot \Delta V + \frac{EV_0}{X} \cos\delta_0 \cdot \Delta V \\ &= \left[\frac{E}{X} \cdot \frac{kEV_0(1+k) + k^2EXI_{d0}\sin\delta_0\cos\delta_0}{kE(1+k)\cos\delta_0 - V_0(1+k)^2} \right] \Delta\delta - \\ &\quad \left[\frac{E}{X} \cdot \frac{V_0^2(1+k)^2\cos\delta_0}{kE(1+k)\cos\delta_0 - V_0(1+k)^2} \right] \Delta\delta - \\ &\quad \left[E\sin\delta_0 \cdot \frac{k^2XI_{d0} + k^2E\sin\delta_0}{V_0(1+k)^2 - kE(1+k)\cos\delta_0} \right] \Delta I_d \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)可简化为

$$\Delta P_e = K_g \Delta\delta - K_q \Delta I_d \quad (12)$$

其中

$$K_g = \frac{E}{X} \cdot \frac{kEV_0(1+k) + k^2EXI_{d0}\sin\delta_0\cos\delta_0}{kE(1+k)\cos\delta_0 - V_0(1+k)^2} - \frac{E}{X} \cdot \frac{V_0^2(1+k)^2\cos\delta_0}{kE(1+k)\cos\delta_0 - V_0(1+k)^2} \quad (13)$$

$$K_q = E\sin\delta_0 \cdot \frac{k^2XI_{d0} + k^2E\sin\delta_0}{V_0(1+k)^2 - kE(1+k)\cos\delta_0} \quad (14)$$

式中: K_g 为系统实现自稳定能力的系数; K_q 为PVS对系统动态特性控制能力的系数;下角标“0”代表变量稳态工作点值。

2 PVS抑制电网振荡机制分析

由第1节分析可知:在机电时间尺度上,PVS与同步机电网间发生交互作用,即PVS在机电振荡过程中和系统间传递有功功率。同时,由于电流环在这个尺度下的控制带宽远不及PVS与同步机电网间的控制带宽,所以控制过程中的电流环可以忽略不计。在此基础上,借助电气转矩分析法,本文探究PVS接入电网对整个电力系统动态特性的影响,分析PVS参与其中的影响规律。

2.1 动态特性

首先,机械动态过程中同步发电机的标准动力学方程如下:

$$\begin{cases} d\delta/dt = \omega \\ 2Hd\omega/dt = P_m - P_e - D(\omega - \omega_s) \end{cases} \quad (15)$$

式中: H 为同步机转动惯量; D 为阻尼系数; ω 为系统实时转速; ω_s 为系统初始转速。

考虑原动机输入机械功率不变,即 $\Delta P_m = 0$ 的情况,式(15)进行线性化可得:

$$\begin{cases} d\Delta\delta/dt = \Delta\omega \\ 2Hd\Delta\omega/dt = -\Delta P_e - D\Delta\omega \end{cases} \quad (16)$$

在电气转矩分析模型中,式(16)所示的动态模型可以被改写成下述常用形式:

$$\begin{cases} d\Delta\delta/dt = \Delta\omega \\ T_J d\Delta\omega/dt = -T_D \Delta\omega - T_S \Delta\delta \end{cases} \quad (17)$$

式中: T_J , T_D 和 T_S 分别为系统的等效惯性、阻尼、同步系数,即在这个动态过程中,同步机系统的惯性效应、阻尼能力和同步特性分别可以由此三个参数的变化所模拟。

基于上述动态特性的分析,本文将进一步从物理机制上分析PVS与同步机电网间的交互作用,探究PVS抑制功率振荡的机理。

2.2 物理机理

在控制过程中,发电机的功角(表征电磁功率)和转子转速(表征电网频率)都可以被用来作为PVS抑制电网功率振荡模式的反馈信号。在电网出现机电振荡现象时,可以将同步机功角/转速反馈到光伏装置,通过PID(或PD)控制即可等效地改变电网的惯量效应、阻尼能力及同步特性,进而改变电网的振荡过程。

由文献[13]可知:在抑制电网功率振荡的过程中,可以让发电机功角或者同步机转速作为反馈信号进行调节。但是,考虑到发电机功角不易测量,且反馈功角时所采用的PD控制无法对系统的惯性效应进行分析,所以本文采用同步机转速反馈控制,以更好地探究系统的惯量、阻尼以及同步特性,控制框图如图4所示。在图4中, ω_{ref} 为额定角频率; ω 为检测角频率; P_{ref} 为通过采集发电机转速来计算得到的有功功率; P 为检测的有功功率; U_{dc} 为直流侧电压; U_{dc}^{ref} 为光伏逆变器直流侧功率调节电压指令; i_{ref} 为通过计算得到的电流指令; i_d 为检测得到的电流。此时的无功功率指令给定值为0,光伏发电系统不再工作于最大功率点,不再输出最大功率,而是留出一部分功率备用,以抑制电网机电振荡。

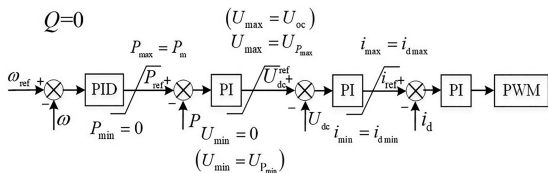


图4 有功功率控制模式下的控制框图

Fig.4 The control block diagram under active power control mode

图5为光伏功率电压特性曲线。

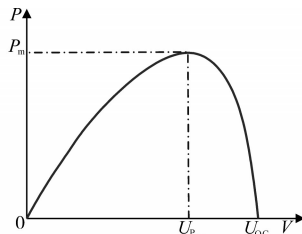


图5 光伏功率电压特性曲线

Fig.5 Photovoltaics' power voltage characteristic curve

由图5可知,光伏输出电压对应唯一的输出功率,调节直流侧电压就相当于调节逆变器侧输出功率。所以,图4中的电压环和功率环可以合并并且省略成如图6所示。并且,为了保证光伏逆变器交流侧电压满足要求,选择图5的下降段[U_{p_max} , U_{oc}](位于最大功率运行点的右侧)作为调节区间。

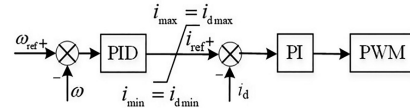


图6 改进的有功功率控制模式控制框图

Fig.6 The control block diagram under improved active power control mode

如图6所示,当采用发电机转速作为反馈信号时,PVS采用PID控制,PVS上的输出电流为

$$I_d = K_p (\omega_0 - \omega) + \frac{K_i}{s} (\omega_0 - \omega) + sK_d (\omega_0 - \omega) \quad (18)$$

式中: K_p, K_i, K_d 分别为PID控制器相应的参数。

在振荡过程中,一旦发电机的反馈转速大于同步转速时,为了抑制发电机转速的持续上升,PVS就吸收有功功率。相反,PVS则输出有功功率。所以,利用PVS对于有功功率的吸收或者输出,就能够同等地改变同步机系统的惯性水平、同步特性和阻尼能力,从而起到抑制发电机侧功率振荡,最终达到同步机系统的频率稳定。针对上述理论,可以被分析解释如下:

1)先将式(18)线性化:

$$\Delta I_d = -K_p \Delta \omega - \frac{K_i}{s} \Delta \omega - sK_d \Delta \omega \quad (19)$$

2)再考虑 $s\Delta\delta = \Delta\omega$,式(19)可等价于

$$\Delta I_d = -K_p \Delta \omega - K_i \Delta \delta - sK_d \Delta \omega \quad (20)$$

3)将式(20)代入式(12),可得:

$$\Delta P_e = (K_g + K_q K_i) \Delta \delta + (K_q K_p + sK_q K_d) \Delta \omega \quad (21)$$

4)考虑线性化后的电磁功率,式(16)可改写为

$$(2H + K_q K_d) \frac{d\Delta\omega}{dt} = -(K_g + K_q K_i) \Delta \delta - (D + K_q K_p) \Delta \omega \quad (22)$$

5)将式(22)与标准动态方程式(17)进行对比可得:

$$T_J = 2H + K_q K_d \quad (23)$$

$$T_S = K_g + K_q K_i \quad (24)$$

$$T_D = D + K_q K_p \quad (25)$$

式(23)~式(25)分别表示:反馈转速(电网频率)条件下、PVS采用PID控制时,同步机电网的惯性水平由D控制器下的参数 K_d 决定,同步特性由I控制器下的参数 K_i 决定,阻尼能力由P控制器下的参数 K_p 决定。

由式(22)可知,当PVS处于反馈转速控制模式下,结构参数、控制参数以及稳态工作点共同决定了系统的惯量效应、阻尼水平以及同步能力^[13]。考虑到控制的可行性以及可操作性,调节PVS的

控制参数便成了其中进行控制最有效的手段。

3 仿真分析

本文通过 Matlab/Simulink 仿真平台来验证上述所提 PVS 参与功率振荡抑制机理分析的正确性。

仿真电路如图 1 所示,主要参数如下:网侧电压 400 V,电网频率 50 Hz, $Z_0=0.01+j0.6 \Omega$, $Z_1=0.01+j0.6 \Omega$, $Z_2=1 \Omega$,光伏串联数 30,光伏并联数 10。本文中考虑光伏电池板的外部特性为恒值,取温度为 25 °C,光照为 1 000 W/m²时的光伏特性。假设发电机侧在 5 s 时发生扰动,系统由于功率失衡开始动作。

图 7 为 D 控制器 K_d 对 PVS 的影响曲线图。

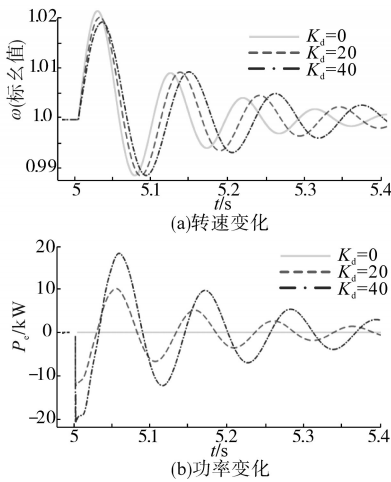


图 7 D 控制器 K_d 对 PVS 的影响

Fig.7 Influence of D controller K_d on PVS

由图 7a 可知,D 控制器对于同步机系统的惯性效应作用如下:在 D 控制器参数 K_d 变化时,同步机系统的惯性水平也相应的发生了改变。当 K_d 增大时,振荡的最大振幅逐渐降低,振荡周期逐渐增大,振荡时间逐渐增长,表明了系统的惯性效应逐渐增强。上述结果与理论推导出的式(23)一致,揭示了 D 控制器能够等效地改变系统的惯性效应,通过调节参数 K_d 可以在一定程度上改善系统的稳定性,从而达到抑制电网振荡的目的。

由图 7b 可知,D 控制器参数 K_d 变化时,PVS 参与系统抑制电网功率振荡的有功功率变化如下:当 K_d 增大时,同步机系统的惯性效应增强,这意味着 PVS 在振荡过程中不断地吸放有功功率,最终吸收了多余的有功功率,平衡了系统的功率方程,达到了系统的稳定。

图 8 为 I 控制器 K_i 对 PVS 的影响曲线图。

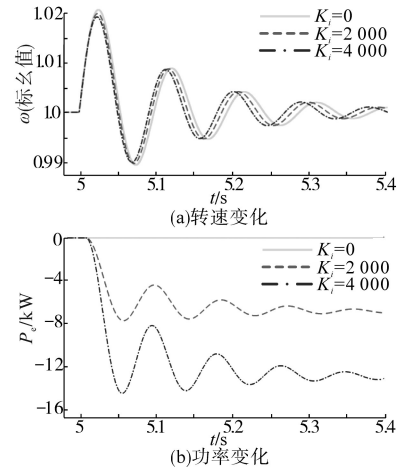


图 8 I 控制器 K_i 对 PVS 的影响

Fig.8 Influence of I controller K_i on PVS

由图 8a 可知,I 控制器对于同步机系统的惯性效应作用如下:随着 I 控制器参数 K_i 的变化,同步机系统的同步特征有了明显的反应。当 K_i 增大时,振荡的最大振幅、衰减速度几乎并未发生变化,但振荡周期逐渐缩短,表明了系统的同步效应逐渐增强。上述结果与理论推导出的式(24)一致,揭示了 I 控制器能够等效地改变系统的同步效应,通过调节参数 K_i 可以缩短振荡时间,以达到快速恢复系统稳定的作用。

由图 8b 可知,I 控制器参数 K_i 变化时,PVS 参与系统抑制电网功率振荡的有功功率变化如下:当 K_i 增大时,同步机系统的同步效应增强,由于积分作用的存在,这意味着 PVS 在振荡过程中不断地吸收有功功率,最终吸收了足够的能量,达到了系统的稳定状态。

图 9 为 P 控制器 K_p 对 PVS 的影响曲线图。

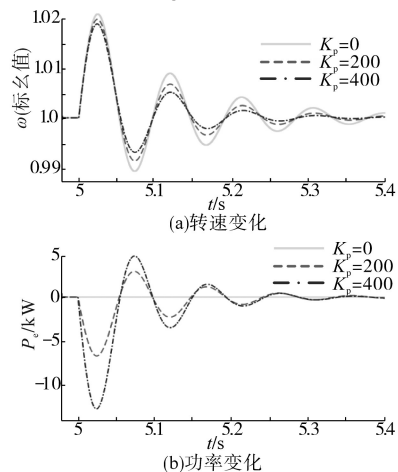


图 9 P 控制器 K_p 对 PVS 的影响

Fig.9 Influence of P controller K_p on PVS

由图 9a 可知,P 控制器对于同步机的阻尼效应作用如下:随着 P 控制器参数 K_p 的变化,同步机系

统的阻尼特征有了明显的反应。当 K_p 增大时,同步机系统的振荡幅度明显减小,衰减速度明显加快,但是振荡周期几乎未发生变化,表明了系统的阻尼效应逐渐增强。上述结果与理论推导出的式(25)一致,揭示了P控制器能够等效地改变系统的阻尼效应,在同样的振荡周期里,调整 K_p 的数值可以加快振荡恢复,从而尽早达到系统稳定。

由图9b可知,P控制器参数 K_p 变化时,PVS参与系统抑制电网功率振荡的有功功率变化如下:当 K_p 增大时,同步机系统的阻尼效应增强,这意味着PVS在振荡过程中不断地调整有功功率的吸收和释放,以达到更好地施加“阻力”,使振荡效果尽快平复。

4 结论

本文从PVS抑制电网功率振荡的数学模型出发,借助电气转矩分析法,得到了表征系统的等效惯性、同步以及阻尼系数。通过反馈转速且采用PID控制,得到PVS控制策略下同步机电网的惯性水平由D控制器下的参数 K_d 决定,同步特性由I控制器下的参数 K_i 决定,阻尼能力由P控制器下的参数 K_p 决定。经过仿真验证可知,在振荡过程中PVS吸收或者释放的有功功率越多,就表明PVS对于系统的动态效果越强、改变程度也越大。不断调节PVS作用下的PID参数,就能够更好地抑制电网功率振荡,平衡系统的功率方程,达到提升电网频率稳定性的目的。

参考文献

- [1] 高海翔,伍双喜,苗璐,等.发电机组引发功率振荡原因及其抑制措施研究综述[J].智慧电力,2018,46(7):49-55,66.
- [2] Xiong L, Li Y, Zhu Y, *et al.* Coordinated control schemes of super-capacitor and kinetic energy of DFIG for system frequency support[J]. *Energies*, 2018, 11(1): 103.
- [3] 苏国贇,杜文娟,王海风.感应电动机群负荷引起的电力系统机电功率振荡研究[J].中国电机工程学报,2019,39(20):5894-5902.
- [4] Zhang J, Chung C Y, Han Y. A novel modal decomposition control and its application to PSS design for damping interarea oscillations in power systems [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27(4): 2015-2025.
- [5] 李青兰,黄伟,陈磊,等.电力系统稳定器影响频率振荡的机理及阻尼分析方法[J].电力系统自动化,2020,44(1):67-73.
- [6] 韩寒,张聪.STATCOM抑制电力系统次同步振荡的研究[J].陕西电力,2015,43(2):30-34.
- [7] 熊连松,卓放,刘小康,等.静止同步补偿器抑制电网功率振荡的机理研究[J].西安交通大学学报,2017,51(12):112-120.
- [8] 苗森.基于自抗扰的STATCOM抑制风电次同步振荡[J].电气传动,2018,48(5):53-58.
- [9] Fan L, Yin H, Miao Z. On active/reactive power modulation of DFIG-based wind generation for interarea oscillation damping [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2011, 26(2): 513-521.
- [10] 邓文博,王海云,常喜强,等.基于SVC的大规模双馈风电场次同步振荡研究[J].高压电器,2019,55(5):214-219.
- [11] Ceaki O, Vatu R, Golovanov N, *et al.* Analysis of SVC influence on the power quality for grid-connected PV plants [C]// 2014 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE), Bucharest, 2014: 1-5.
- [12] 路晓敏,陈磊,陈亦平,等.电力系统一次调频过程的超低频振荡分析[J].电力系统自动化,2017,41(16):64-70.
- [13] 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.
- [14] 薛阳,郑蓉,郑梦秋,等.基于准Z源逆变器的光伏发电系统 H_∞ 鲁棒控制[J].电气传动,2018,48(7):55-59.
- [15] Azofra D, Martínez E, Jiménez E, *et al.* Comparison of the influence of photovoltaic and wind power on the Spanish electricity prices by means of artificial intelligence techniques [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 42(C): 532-542.
- [16] 傅业盛,桑姐,曹炜,等.欧盟的REserviceS项目以及对我国风电及光伏参与电网调频的启示[J].电网技术,2019,43(2):613-621.
- [17] 杨明,杜少通,郑征,等.大规模光伏并网系统谐振机理及稳定性分析[J].电源学报,2019,17(1):53-61.
- [18] Zhu M, Zhuo F. Research on the control strategy of PV system on suppressing low-frequency oscillation in power system [C]// 2014 International Power Electronics and Application Conference and Exposition, Shanghai, 2014: 584-587.
- [19] 余希瑞,周林,郭珂,等.多模型自适应控制应用于大型光伏电站阻尼区间振荡[J].中国电机工程学报,2017,37(14):4036-4043,4282.
- [20] Zhu M, Zhuo F. A novel method for low-frequency oscillation suppression based on PV system [C]// 2014 International Power Electronics and Application Conference and Exposition, Shanghai, 2014: 251-254.
- [21] Xiong Liansong, Wang Dongjie. Research on suppression mechanism of STATCOM on power oscillations [C]// 2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017-ECCE Asia), Kaohsiung, 2017: 806-811.
- [22] 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.
- [23] 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 Trans. Power Electron*, 2016, 31(9): 6264-6280.

收稿日期:2020-01-07

修改稿日期:2020-03-06