

DOI: 10.7652/xjtuxb201712017

静止同步补偿器抑制电网功率振荡的机理研究

熊连松¹, 卓放², 刘小康², 杨苹³, 许志荣³
(1. 南京工程学院自动化学院, 211167, 南京; 2. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安;
3. 华南理工大学广东省绿色能源技术重点实验室, 510640, 广州)

摘要: 为了揭示静止同步补偿器抑制电网功率振荡的机理,基于电气转矩分析法通过建立含静止同步补偿器的单机无穷大电网的机电尺度数学模型,分析了静止同步补偿器在电网功率振荡抑制模式下影响同步发电机动态特性的物理机制,解释了不同控制策略影响电网等效惯性系数、同步系数与阻尼系数的原理。研究表明:反馈同步机功角时,P、D 控制器分别等效地改变系统的等效同步系数和等效阻尼系数;反馈发电机转速时,P、I、D 控制器则分别等效地改变系统的等效阻尼系数、同步系数、惯性系数;上述动态参数均随 P、I、D 控制器控制系数的增大而增加。为了充分发挥静止同步补偿器对电网功率振荡的抑制作用,进一步分析了影响振荡抑制性能的关键因素及其作用规律,可为静止同步补偿器控制策略的分析和设计提供理论基础。仿真结果验证了静止同步补偿器抑制电网功率振荡机理分析结论的正确性。

关键词: 静止同步补偿器;功率振荡;虚拟惯性;等效阻尼系数;等效同步系数

中图分类号: TM315 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)12-0112-09

Analysis on Mechanism of Power Oscillation Mitigation by STATCOM

XIONG Liansong¹, ZHUO Fang², LIU Xiaokang², YANG Ping³, XU Zhirong³
(1. School of Automation, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A model of the single-machine infinite-bus system containing STATCOM on the electromechanical time scale is deduced to understand the mechanism of STATCOM affecting the grid power oscillation. The dynamic physical mechanism of STATCOM affecting the transient performance of synchronous generator in the power oscillation mitigation mode is discussed by adopting the method of electrical torque analysis. The results show that when the power angle is used as feedback signal, P and D controllers affect the synchronizing and the damping characteristics of the synchronous generator, respectively; and when the rotor speed is utilized as the feedback signal, P, I and D controllers affect the damping, synchronizing and inertia characteristics, respectively. In addition, the principles of different control strategies that influence the equivalent inertia, the synchronizing and the damping coefficients of the power grid are explained. Moreover, the important factors that influence the performance of power oscillation mitigation are analyzed, providing a theoretical foundation for the design of

收稿日期: 2017-04-12。 作者简介: 熊连松(1986—),男,讲师。 基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51707091);国家重点基础研究发展计划资助项目(2015CB251001);广东省绿色能源技术重点实验室运行经费资助项目(2014B030301022);南京工程学院高层次引进人才科研启动基金资助项目(YKJ201613)。

网络出版时间: 2017-09-22 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170922.1743.016.html>

时,减小发电机的输出功率以抑制功角的增大,通过上述运行方式即可实现功率振荡的快速抑制^[13-16]。

为了从数学模型上研究无功控制过程的机理,将图1所示的物理系统简化为图2。SG用电动势 $E\angle\delta$ 串联同步电抗 X 的简化模型来表示, X_L 为传输线的等效电抗,且 $X_L=kX$ 。考虑到功率振荡属于机电时间尺度(秒级)的慢过程,而全控型PWM逆变器的响应速度非常快,属于毫秒级的电磁时间尺度的快过程,因此可将STATCOM视为受控电流源,根据振荡抑制模式的需要,输出可控的电流 I_q 。若未特别说明,本文的物理量均指标么值。

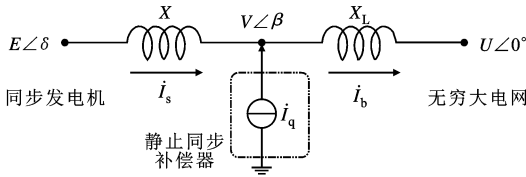


图2 STATCOM接入单机无穷大系统模型

图2模型的相量图如图3所示。为了简化分析过程,假设 E 、 U 恒定不变,且 $E=U$ 。

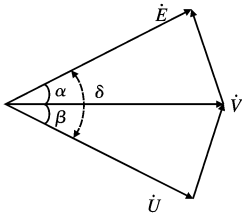


图3 系统模型的相量图

STATCOM稳态运行时,通过向系统注入无功功率来影响注入点的电压 V ,进而影响SG的电磁功率。在图2所示的电路模型中,SG输出的电磁功率为

$$P_e = EV \sin \alpha / X \quad (2)$$

无穷大电网吸收的有功功率为

$$P_\infty = VU \sin \beta / kX \quad (3)$$

分析SG的静态稳定性及其动态失稳机制时,常用其线性化模型(也称为增量方程),即

$$\left. \begin{aligned} d\Delta\delta/dt &= \Delta\omega \\ 2Hd\Delta\omega/dt &= \Delta P_m - \Delta P_e - D\Delta\omega \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

假定原动机的输入功率保持恒定,即 $\Delta P_m = 0$ 。将式(2)线性化并代入式(4)得到标准动态方程

$$\left. \begin{aligned} d\Delta\delta/dt &= \Delta\omega \\ T_J d\Delta\omega/dt &= -T_S \Delta\delta - T_D \Delta\omega \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: T_J 、 T_S 、 T_D 为表征系统惯性水平、同步能力、阻尼能力的等效惯性系数、同步系数、阻尼系数。

2 抑制功率振荡的物理机制分析

以图2为基础,分析在不同的控制策略与反馈信息下STATCOM抑制电网振荡的机制。根据电路系统的有功平衡原则可知

$$k \sin \alpha = \sin \beta \quad (6)$$

由基尔霍夫定律可得

$$\frac{E\angle\delta - V\angle\beta}{jX} + I_q\angle(\beta + 90^\circ) = \frac{V\angle\beta - U}{jkX} \quad (7)$$

式(7)可等价

$$kE \sin \delta - kXI_q \sin \beta = (1+k)V \sin \beta \quad (8)$$

$$kE \cos \delta - kXI_q \cos \beta = (1+k)V \cos \beta - U \quad (9)$$

整理式(9),且考虑式(6)以及 $E=U$,可得

$$\sin \alpha = \frac{E \sin \delta}{(1+k)V + kXI_q} \quad (10)$$

$$(k^2 + 2k \cos \delta + 1)E^2 = [(1+k)V + kXI_q]^2 \quad (11)$$

发电机输出的电磁功率为

$$P_e = \frac{EV}{X} \sin \alpha = \frac{EV}{X} \frac{E \sin \delta}{(1+k)V + kXI_q} \quad (12)$$

根据图2所示系统的工作原理与物理意义可知,式(11)中的电压 V 由发电机功角 δ 、STATCOM输出电流 I_q 共同作用,将式(11)线性化可得

$$\Delta V = -\frac{k}{1+k} \left[\frac{E^2 \sin \delta_0}{(1+k)V_0 + kXI_{q0}} \Delta \delta + X \Delta I_q \right] \quad (13)$$

式(12)中的 V 为中间变量, P_e 最终仅由 δ 、 I_q 这2个因素共同决定。可对式(12)进行线性化,且考虑式(13)进行化简后可得

$$\Delta P_e = K_g \Delta \delta - K_q \Delta I_q \quad (14)$$

式中: K_g 为电网自身的同步系数,表征系统自身的同步能力; K_q 为STATCOM控制系数,表征对系统动态特性的控制能力,且 K_g 、 K_q 分别为

$$K_g = X \left(\frac{P_{e0}}{V_0} \right)^2 \left(\frac{kXP_{e0}}{E^2 \sin \delta_0} - \frac{k}{1+k} \right) + \frac{\cos \delta_0}{\sin \delta_0} P_{e0} \quad (15)$$

$$K_q = \frac{kXP_{e0}}{(1+k)V_0} \quad (16)$$

式中:下标含“0”的参数表示取该参数的稳态点。

由图1所示的STATCOM装置控制策略可知,处于振荡抑制模式时,控制策略的反馈信号主要包括发电机转子转速、功角(即转子位置)2大类。反馈电磁功率的控制方法与反馈转子位置的方法是等效的。以下分别考虑转速、功角反馈时,控制系统对SG等效动态参数的影响规律。基于功角反馈的I

控制器没有实际的物理意义,且其对功率振荡的作用与 I 控制器的参数 K_i 呈现出非单调的关系,这一特性不利于振荡抑制算法的设计,也没有文献或者实际工程利用了基于功角信息反馈的 I 控制器,因此本文也不对其做具体的分析。

2.1 反馈功角

当反馈功角^[6-7,10,14]且采用 PD 控制时

$$I_q = K_p(\delta_{\text{ref}} - \delta) + sK_d(\delta_{\text{ref}} - \delta) \tag{17}$$

式(17)的增量关系为

$$\Delta I_q = -K_p \Delta \delta - sK_d \Delta \delta \tag{18}$$

考虑转速与功角关系之后,则式(18)等价为

$$\Delta I_q = -K_p \Delta \delta - K_d \Delta \omega \tag{19}$$

将式(19)代入式(14)可得

$$\Delta P_e = (K_g + K_q K_p) \Delta \delta + K_q K_d \Delta \omega \tag{20}$$

式(4)所示的机电方程可转化为

$$2Hd\Delta\omega/dt = -(K_g + K_q K_p) \Delta \delta - (D + K_q K_d) \Delta \omega \tag{21}$$

将式(21)与式(5)所示的 SG 动态方程进行对比可知,当反馈功角且采用 PD 控制时,STATCOM 同时影响 SG 的同步转矩与阻尼转矩,且 P 控制器主要影响 SG 的等效同步系数,D 控制器主要影响 SG 的等效阻尼系数,且

$$T_s = K_g + K_q K_p \tag{22}$$

$$T_D = D + K_q K_d \tag{23}$$

2.2 反馈转速

反馈转速^[8,12,15,19-20]且采用 PID 控制时

$$I_q = K_p(\omega_s - \omega) + K_i(\omega_s - \omega)/s + sK_d(\omega_s - \omega) \tag{24}$$

式(24)的增量关系为

$$\Delta I_q = -K_p \Delta \omega - K_i \Delta \omega / s - sK_d \Delta \omega \tag{25}$$

考虑转速与功角关系后,式(25)等价为

$$\Delta I_q = -K_p \Delta \omega - K_i \Delta \delta - sK_d \Delta \omega \tag{26}$$

将式(26)代入式(14)可得

$$\Delta P_e = (K_g + K_q K_i) \Delta \delta + K_q K_p \Delta \omega + sK_q K_d \Delta \omega \tag{27}$$

式(4)所示的机电方程可转化为

$$(2H + K_q K_d) d\Delta\omega/dt = -(K_g + K_q K_i) \Delta \delta - (D + K_q K_p) \Delta \omega \tag{28}$$

将式(28)与式(5)进行对比可知,当反馈发电机的转子转速且采用 PID 控制时,STATCOM 将同时改变 SG 的惯性系数以及同步转矩与阻尼转矩,且 P 控制器主要影响 SG 的等效阻尼系数,I 控制器主要影响 SG 的等效同步系数,D 控制器主要影响 SG 的惯性系数,且

$$T_J = 2H + K_q K_d \tag{29}$$

$$T_s = K_g + K_q K_i \tag{30}$$

$$T_D = D + K_q K_p \tag{31}$$

综上所述,将 STATCOM 抑制电网功率振荡的物理机制列于表 1。

表 1 STATCOM 抑制电网功率振荡的物理机制

控制策略		惯性系数	同步系数	阻尼系数
		T_J	T_s	T_D
反馈 功角	P 控制器	×	✓	×
	I 控制器	—	—	—
	D 控制器	×	×	✓
反馈 转速	P 控制器	×	×	✓
	I 控制器	×	✓	×
	D 控制器	✓	×	×

注:“✓”“×”分别表示控制策略对相应的动态参数有、没有控制能力;“—”表示该控制策略不可用。

需要说明的是,与转子转速相比,功角一般不太容易直接测取,目前文献中提出的转子位置测量法大多属于间接测量方法。实际工程中常用发电机电磁功率作为功角的替代反馈量^[7]。

3 振荡抑制效果的影响规律分析

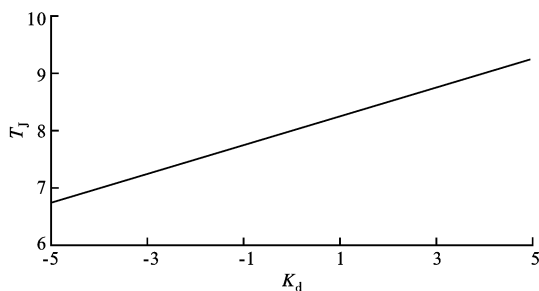
由上述分析可知,影响振荡抑制性能的因素主要有控制参数、结构参数以及稳态工作点参数 3 大类,以下将分别分析这些参数的影响规律。

3.1 控制参数的影响规律分析

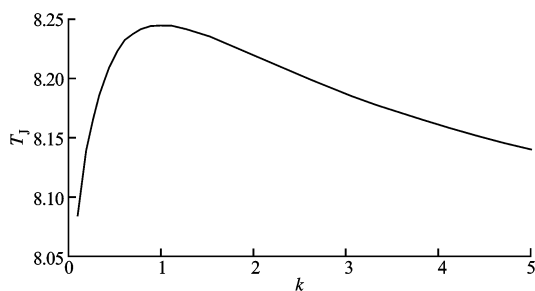
控制参数即为 PID 控制器的参数 K_p 、 K_i 、 K_d 。根据式(22)、式(23)以及式(29)~式(31)可知,除了反馈功角的 I 控制器以外,在 K_p 、 K_i 、 K_d 均为正的情况下,振荡抑制能力随着上述参数的增大而显著增强;若上述参数为负,则 STATCOM 的投入将削弱系统对功率振荡的抑制能力;当上述参数超出临界值后,系统将因自身稳定裕量被 STATCOM 抵消而失稳。图 4 分别给出了反馈转速时 T_J 、 T_s 、 T_D 与 K_p 、 K_i 、 K_d 间的数值关系。其中, $k=1$, $X=0.5$, $V_0=1.0$, $\delta=\pi/3$, $P_{e0}=1.0$, $I_{q0}=-0.5$, $D=2.0$, $H=4\text{ s}$ 。

3.2 最优安装位置分析

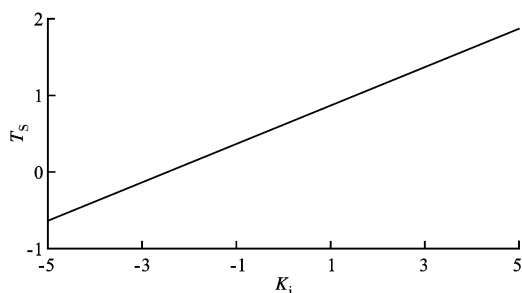
最优的安装位置是在同等的无功容量且传输同等有功功率的前提下,能够使系统等效动态参数最大化的位置。假设线路的总阻抗 X_T 保持恒定不变,且 $X_T = X_L + X = (1+k)X$ 。此外, $X_T=1.0$, $P_{e0}=1.0$, $I_{q0}=-0.6$, $D=2.0$, $H=4\text{ s}$, $K_p=10$,



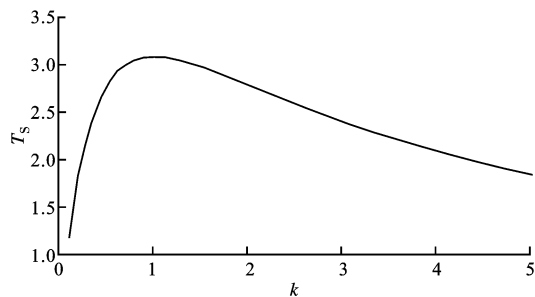
(a) 惯性系数



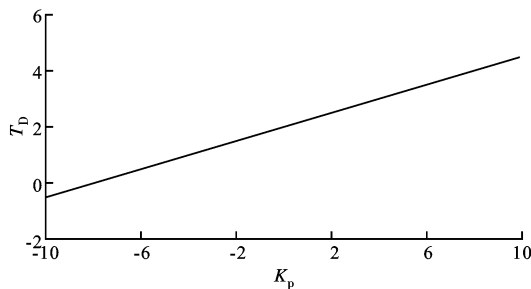
(a) 惯性系数



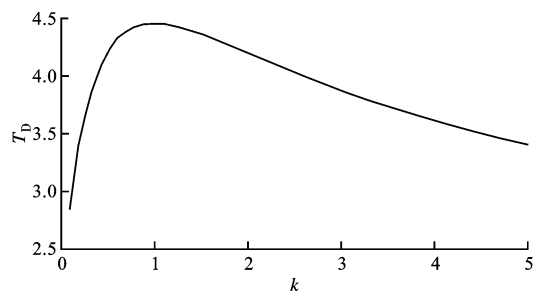
(b) 同步系数



(b) 同步系数



(c) 阻尼系数



(c) 阻尼系数

图4 STATCOM 控制参数的影响规律

图5 STATCOM 安装位置的影响规律

$K_i=10, K_d=1$ 。图5给出了随着STATCOM安装位置 k 变化时 T_J 、 T_S 、 T_D 的变化规律。

实验结果表明,当静止同步补偿器位于传输线中心位置(即 $k=1$)时, T_J 、 T_S 、 T_D 均同时达到最大值;当接入点越靠近发电机侧(即 $k>1$)或越靠近无穷大电网侧(即 $k<1$)时,STATCOM对振荡的抑制能力越弱。当STATCOM位于发电机(即 k 趋于无穷大)或者无穷大电源处(即 k 趋于0)时,STATCOM丧失了电压调节能力,进而丧失了对发电机有功功率调节的能力,因此不能辅助电网进行振荡抑制。当STATCOM处于传输线正中心位置(即 $k=1$)时,STATCOM对并网点电压的调节能力最强,并进而对发电机的有功功率进行高灵敏度调控,促使振荡过程迅速地平息。

3.3 电网结构参数的影响规律分析

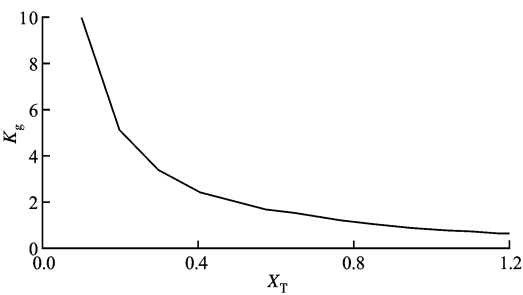
在图2所示的原理图中,电网的结构参数仅为传输线等效阻抗 X_T 。图6分别给出了电网自身同

步系数 K_g 、STATCOM控制系数 K_q 以及等效同步系数 T_S 随着 X_T 改变时的变化规律。其中, $k=1$, $P_{e0}=0.8$, $I_{q0}=-0.5$, $K_i=35$,其余参数不变。

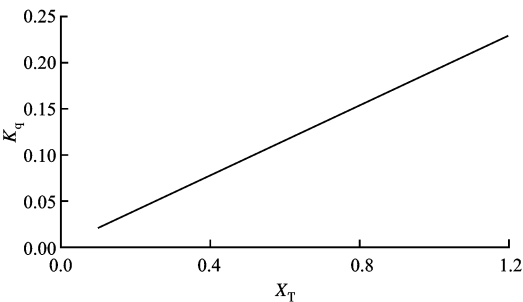
随着传输线等效阻抗 X_T 的增加, K_g 逐步减小,如图6a所示,同时 K_q 却线性地增加,如式(16)、图6b所示,且 X_T 较小时, K_g 变化剧烈,而 X_T 较大时, K_g 变化缓慢,因此当 X_T 较小时,施加控制之后的等效同步系数 T_S 主要由电网的同步系数 K_g 决定,当 X_T 较大时则主要由STATCOM决定,因此随着 X_T 的增加, T_S 呈现出先降低再增大的趋势,如图6c所示。由式(29)、式(31)可知, T_J 、 T_D 仅与STATCOM的控制系数 K_q 有关,因此 T_J 、 T_D 的变化规律与 K_q 一致,即 X_T 越大, T_J 、 T_D 也越大。

3.4 电网稳态工作点参数的影响规律分析

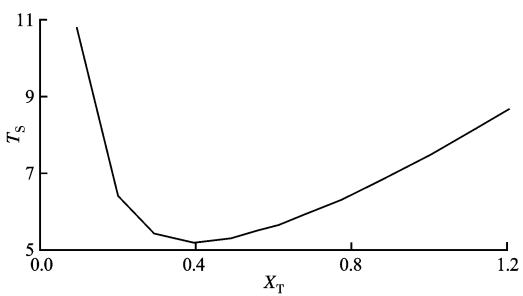
电网的稳态工作点参数主要包含SG输出的电



(a)电网自身的同步系数

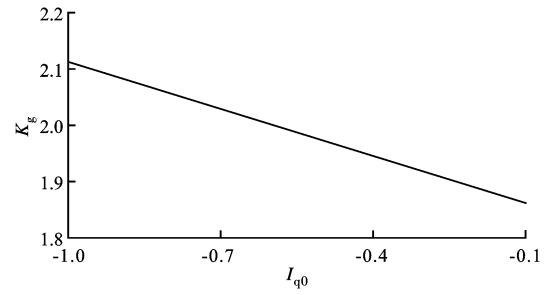


(b)STATCOM 控制系数

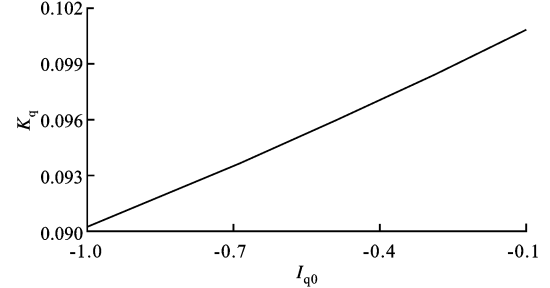


(c)施加控制后的电网等效同步系数

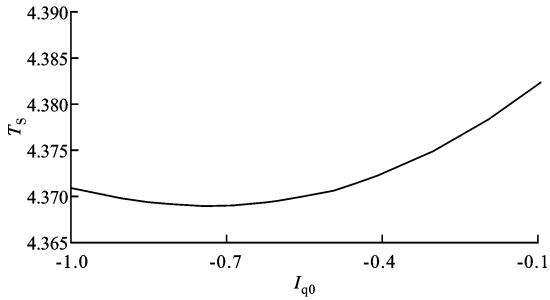
图 6 电网结构参数的影响规律



(a)电网自身同步系数



(b)STATCOM 控制系数



(c)施加控制后的电网等效同步系数

图 7 稳态无功电流的影响规律

磁功率 P_{e0} (或者功角 δ_0) 与 STATCOM 的稳态无功电流 I_{q0} 。图 7、图 8 分别给出了电网自身同步系数 K_g 、STATCOM 控制系数 K_q 以及等效同步系数 T_s 随 I_{q0} 、 P_{e0} 改变时的变化规律。其中, $P_{e0} = 0.8$ ($I_{q0} = -0.5$), $X_T = 0.5$, $K_i = 25$, $k = 1$, 其余的参数保持不变。

由图 7 可以看出,随着 I_{q0} 的增大, K_g 也逐渐增大, K_q 却线性地减小,因此随着无功电流的增加,电网的电压稳定水平相应地提升,电网的静态稳定裕度也获得提升,电网的同步能力(通过 K_g 表征)得到加强。稳态无功电流越大,STATCOM 在振荡过程中的调节范围就越小,控制能力就越弱。

I_{q0} 对 K_g 、 K_q 的影响不大,因此稳态无功电流对施加控制后的等效同步系数 T_s 的影响也不大,因为 STATCOM 在稳态运行时,对系统动态特性几乎没有影响,只有当其运行在振荡抑制模式时,才能

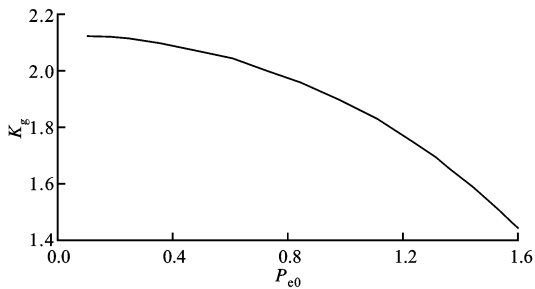
对电网动态行为产生明显的影响力。

由图 8 可以看出:随着 P_{e0} 增大, K_g 逐渐减小,如图 8a 所示;随着 P_{e0} 增大, K_q 却线性地增大,如图 8b 所示。显然,随着 SG 输出功率的增加,系统将逐渐趋近于静态稳定极限,系统自身的稳定能力也将逐渐降低,但 STATCOM 的控制系数 K_q 将逐渐增大,即装置的振荡抑制能力相对地增强了。

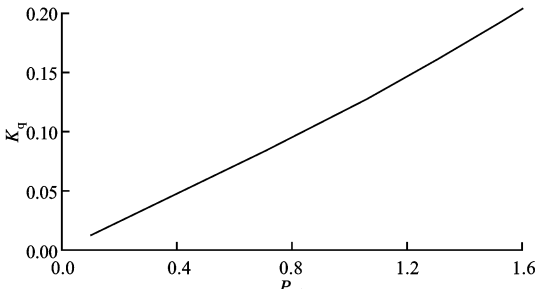
总体而言, P_{e0} 的变化对 K_g 、 K_q 的影响较大,尤其是对 K_q 的影响明显,因此 SG 的稳态点变化对施加控制后的等效同步系数 T_s 的影响很大。当 K_i 为 25 或更大时, T_s 主要取决于 STATCOM 的运行模式,会对电网的动态行为产生明显的影响力。

4 仿真实验

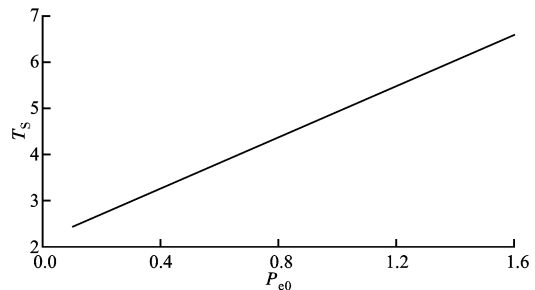
本文利用 Matlab/simulink 仿真工具来验证电网功率振荡抑制机理分析的正确性,仿真电路如图



(a)电网自身同步系数



(b)STATCOM 控制系数



(c)施加控制后的电网等效同步系数

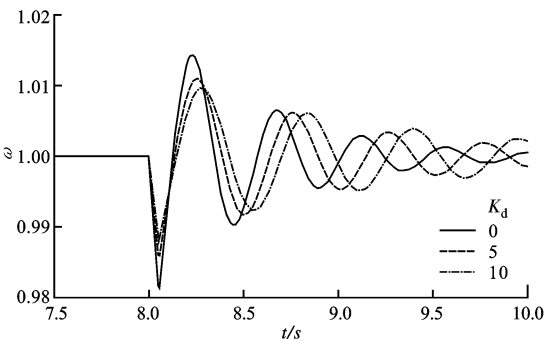
图 8 发电机稳态功率的影响规律

1 所示,主要参数见表 2。图 9 分别给出了在反馈发电机转速的前提下,D、I 及 P 控制器分别对同步发电机动态特性的影响规律。

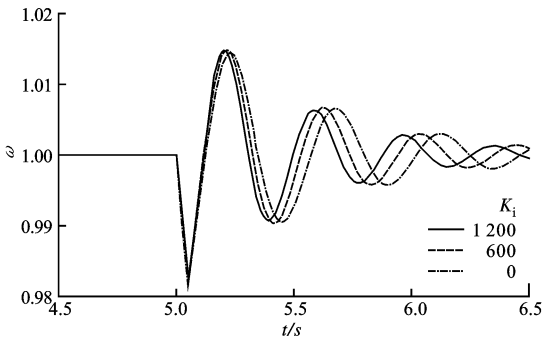
表 2 仿真系统的参数

参数	数值	参数	数值
电网线电压/V	380	电网频率/Hz	50
$Z/\text{m}\Omega$	$0.1+\text{j}0.1$	开关频率/kHz	10
$Z_{\text{L}}/\text{m}\Omega$	$1+\text{j}3$	直流侧电压/V	1 000
L/mH	0.9	P_{m}/MW	80

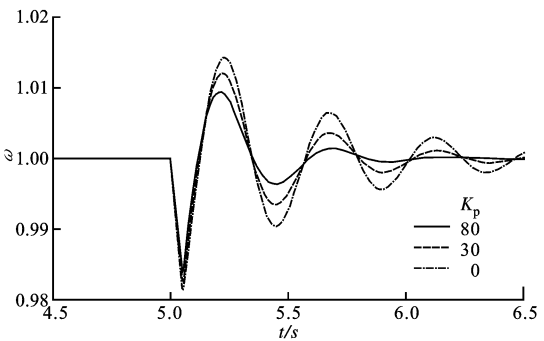
由图 9a 可以看出,在 D 控制器的作用下,同步机的惯性特征发生了明显的变化,验证了式(29)的结论,即 D 控制器等效改变了 SG 的惯性。随着 D 控制器参数 K_{d} 的增大,最大振幅逐渐降低,振荡周期逐渐增大,振荡时间逐渐增长(阻尼水平降低),即系统的等效惯量逐渐增大。



(a)惯性系数的影响



(b)同步系数的影响



(c)阻尼系数的影响

图 9 仿真验证结果

由图 9b 可以看出,在 I 控制器的作用下,发电机的振荡周期发生了变化,但最大振幅、衰减速度等几乎未发生变化,表明 I 控制器主要影响发电机的同步运行能力,验证了式(30)得出的结论。随着 I 控制器参数 K_{i} 的增大,振荡周期逐渐减小,因此系统的等效同步能力逐渐增大了。

由图 9c 可以看出,仅在 P 控制器的作用下,同步发电机的振荡周期几乎不变,但最大振幅以及衰减速度等发生了明显的变化,在强阻尼作用下,振荡过程快速地衰减了,最大振幅也降低了,说明 P 控制器主要影响同步发电机的阻尼水平,即验证了式(31)得出的结论。随着 P 控制器参数 K_{p} 的增大,振荡过程的衰减速度越来越快(阻尼能力增强),即

系统的阻尼能力逐渐增强。

5 结 论

基于电气转矩分析法,分析了 STATCOM 在功率振荡抑制模式下影响电网动态特性的机制,得出了如下结论:反馈功角时,P、D 控制器分别等效地改变了 SG 的等效同步系数、等效阻尼系数;反馈发电机转速时,P、I、D 控制器则分别等效地改变了 SG 的等效阻尼系数、等效同步系数、等效惯性系数;上述参数均随 P、I、D 控制器控制系数的增大而增加。当 STATCOM 位于电网传输线正中心位置时,可获得最优的振荡抑制性能;随着电网等效电抗的增加,同步能力将逐步减弱,而 STATCOM 的控制能力则逐渐增强,因此系统的等效同步系数呈现出先降低再增大的规律;STATCOM 的稳态无功电流对系统的动态特性影响不大,但 SG 的稳态输出功率却对系统的动态特性有显著的影响,且发电机稳态功率越大,电网自身的同步能力就越弱,STATCOM 的控制能力则越强,电网的等效同步水平也将显著提升;电网的等效惯性水平以及阻尼能力主要取决于 STATCOM 的控制系数,因此将随着电网等效电抗以及稳态工作点的增大而增强。

参考文献:

- [1] DU W, WANG H F, CAO J, et al. Application of the phase compensation method for the design of a DC/AC converter-based stabilizer to damp inter-area power oscillations [J]. IEEE Transactions on Power System, 2012, 27(3): 1302-1310.
- [2] 张帆, 徐政. 电力系统稳定器抑制次同步谐振的效果 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(6): 121-127.
ZHANG Fan, XU Zheng. Effect of exciter and power system stabilizer on subsynchronous resonance damping [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(6): 121-127.
- [3] 郑希云, 李兴源, 王渝红. 基于混沌优化算法的 PSS 和直流调制的协调优化 [J]. 电工技术学报, 2010, 25(5): 170-175.
ZHENG Xiyun, LI Xingyuan, WANG Yuhong. Coordination and optimization of PSS and HVDC modulations using chaotic optimization algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(12): 170-175.
- [4] ZHANG Junbo, CHUNG C Y, HAN Yingduo. A novel modal decomposition control and its application to PSS design for damping interarea oscillations in power systems [J]. IEEE Transactions on Power System, 2012, 27(4): 2015-2025.
- [5] 何金平, 毛承雄, 陆继明, 等. 电压源型全控器件励磁控制策略 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 240-247.
HE Jinping, MAO Chengxiong, LU Jiming, et al. Control strategy of voltage source converter excitation system based on full controlled devices [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 240-247.
- [6] 毛承雄, 何金平, 王丹, 等. 全控器件励磁系统的多变量反馈线性化控制 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 53-60.
MAO Chengxiong, HE Jinping, WANG Dan, et al. Multivariable feedback linearization scheme for new excitation systems based on full controlled devices [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 53-60.
- [7] 陈仲伟, 邹旭东, 段善旭, 等. 利用柔性功率调节器抑制电力系统功率振荡 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 196-204.
CHEN Zhongwei, ZOU Xudong, DUAN Shanxu, et al. Mitigating the power oscillation by the flexible power conditioner [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 196-204.
- [8] ANDES E L, JUAN M M, JORGE A S. Subsynchronous resonance mitigation using variable speed wind energy conversion systems [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2013, 7(5): 511-525.
- [9] FAN Lingling, YIN Haiping, MIAO Zhixin. 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] KATHERINE E, MEHRDAD G. Non-linear power oscillation damping controllers for doubly fed induction generators in wind farms [J]. IET Renewable Power Generation, 2013, 7(2): 172-179.
- [11] FAN Lingling, MIAO Zhixin. Mitigating SSR using DFIG-based wind generation [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(3): 349-358.
- [12] 龙源, 李国杰, 程林, 等. 利用光伏发电系统抑制电网功率振荡的研究 [J]. 电网技术, 2006, 30(24): 44-49.
LONG Yuan, LI Guojie, CHENG Lin, et al. A study on damping power system oscillations based on photovoltaic system [J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 44-49.
- [13] HASSAN L H, MOGHAVVEMI M, ALMURIB H

- F, et al. A coordinated design of PSSs and UPFC-based stabilizer using genetic algorithm [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(5): 2957-2966.
- [14] KHALED M A, YASSER A I M. A simple approach to damp SSR in series-compensated systems via reshaping the output admittance of a nearby VSC-based system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(5): 2673-2682.
- [15] MOHAMED S E, BIRGITTE B J, MANSOUR H A. Novel STATCOM controller for mitigating SSR and damping power system oscillations in a series compensated wind park [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(2): 429-441.
- [16] MITHULANTHAN N, CANIZARES C A, REEVE J, et al. Comparison of PSS, SVC, and STATCOM controllers for damping power system oscillations [J]. IEEE Transactions on Power System, 2003, 18(2): 786-792.
- [17] WANG H F. Interactions and multivariable design of STATCOM AC and DC voltage control [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2003, 25(5): 387-394.
- [18] CLAUDIO A C, MASSIMO P, SANDRO C, et al. STATCOM modeling for voltage and angle stability studies [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2003, 25(6): 431-441.
- [19] 赵静波, 雷金勇, 甘德强. 电池储能装置在抑制电力系统低频振荡中的应用 [J]. 电网技术, 2008, 32(6): 93-99.
- ZHAO Jingbo, LEI Jinyong, GAN Deqiang. Application of battery energy storage devices in suppressing low-frequency oscillation of power system [J]. Power System Technology, 2008, 32(6): 93-99.
- [20] XIE Xiaorong, WANG Liang, GUO Xijiu, et al. Development and field experiments of a generator terminal subsynchronous damper [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(4): 1693-1701.
- 7652/xjtuxb201506016]
- 吴海峰, 鲁军勇, 马伟明, 等. 大功率混合储能装置控制策略研究. 2015, 49(2): 93-98. [doi: 10. 7652/xjtuxb201502016]
- 索江镭, 胡志坚, 刘宇凯, 等. 大规模光伏发电并网对互联电力系统阻尼特性的影响及其阻尼控制策略. 2015, 49(2): 99-105. [doi: 10. 7652/xjtuxb201502017]
- 耿志清, 卓放, 宁改娣, 等. 孤岛微电网中逆变器并联功率与电压均衡控制技术研究. 2014, 48(12): 41-48. [doi: 10. 7652/xjtuxb201412007]
- 郭伟, 王跃, 李宁. 永磁同步电机飞轮储能系统充放电控制策略. 2014, 48(10): 60-65. [doi: 10. 7652/xjtuxb201410010]
- 吴彬, 揭贵生, 王恒利, 等. 无隔离三相逆变器两种直流分量抑制策略对比. 2014, 48(6): 60-64. [doi: 10. 7652/xjtuxb201406011]
- 丁文俊, 宋保维, 毛昭勇, 等. 浅水域探测型无人水下航行器海洋动能发电装置特性研究. 2014, 48(4): 73-78. [doi: 10. 7652/xjtuxb201404013]
- 包献文, 卓放, 谭佩喧. 三相 LCL 型并网逆变器的模型分析及解耦控制. 2014, 48(2): 44-49. [doi: 10. 7652/xjtuxb201402008]
- 续丹, 包鑫, 霍小宁, 等. 永磁同步电机宽速域无位置传感器控制. 2013, 47(9): 60-64. [doi: 10. 7652/xjtuxb201309010]
- 王先为, 卓放. 三相四桥臂并联逆变器的零序电流建模与控制. 2012, 46(10): 8-14. [doi: 10. 7652/xjtuxb201210002]
- 王颖博, 宁改娣, 王跃. 分布式静止同步串联补偿器抑制次同步谐振机理研究. 2011, 45(8): 102-107. [doi: 10. 7652/xjtuxb201108018]
- 岳涵, 赵登福, 夏道止, 等. 求解大型电力系统机电振荡模态的逆幂方法. 2010, 44(10): 93-98. [doi: 10. 7652/xjtuxb201010018]
- 赵国鹏, 刘进军. 静止无功发生器直流侧电压对无功补偿特性的影响研究. 2010, 44(4): 66-70. [doi: 10. 7652/xjtuxb201004015]
- 杨黎晖, 马西奎, 戴栋. 变速恒频双馈感应电机系统中的低频振荡现象分析. 2009, 43(8): 95-100. [doi: 10. 7652/xjtuxb200908020]
- 袁敞, 刘进军, 王晓钰, 等. 一种新型串联型有源电力滤波器无谐波检测控制方法. 2009, 43(2): 86-89. [doi: 10. 7652/xjtuxb200902019]
- 别朝红, 周婷, 王锡凡. 电力系统多时段无功优化研究. 2008, 42(6): 698-702. [doi: 10. 7652/xjtuxb200806011]
- 宁改娣, 何世杰, 王跃, 等. 静止同步串联补偿器抑制次同步谐振研究. 2008, 42(2): 189-193. [doi: 10. 7652/xjtuxb200802014]
- 李静耘, 杜正春, 楚国莉, 等. 基于聚类的多运行方式下电力系统稳定器设计. 2008, (2): 204-208. [doi: 10. 7652/xjtuxb200802017]

[本刊相关文献链接]

- 马秀达, 康小宁, 李少华, 等. 多端柔性直流配电网的分层控制策略设计. 2016, 50(8): 117-122. [doi: 10. 7652/xjtuxb201608019]
- 张蕾, 张爱民, 景军锋, 等. 静止无功补偿器与发电机励磁系统的自适应鲁棒协调控制策略. 2015, 49(11): 96-101. [doi: 10. 7652/xjtuxb201511016]
- 李宇飞, 王跃, 冯宇鹏, 等. 级联 H 桥型多电平逆变器中变压器偏磁抑制控制方法研究. 2015, 49(6): 96-102. [doi: 10.

(编辑 武红江 杜秀杰)