

文章编号:1671-6833(2020)04-0081-06

大容量调相机 PSVR 参数调整

陈 强¹, 王 骅¹, 王克文², 刘艳红²

(1.国网河南省电力公司 电力科学研究院,河南 郑州 450000; 2.郑州大学 电气工程学院,河南 郑州 450001)

摘 要:加装电力系统电压调节器 PSVR 的大容量同步调相机可为特高压直流输电提供有效的暂态电压支撑。以河南电网新增的两台大容量同步调相机为例,从调相机动态特性和小干扰稳定性角度进行 PSVR 参数调整。分析调相机无功出力、PSVR 参数对电压特性和功角特性的影响,提出针对调相机 PSVR 的参数调整方法;以调相机电压幅角特性曲线的均方根最小化为目标,调整 PSVR 移相环节时间常数;通过全网小干扰稳定特征值计算,确定调相机参与的电压振荡模式;依据不同系统运行方式、不同调相机无功出力下的电压振荡模式,结合功角振荡模式的核算,确定 PSVR 增益系数调整范围。所述方法能降低 PSVR 对功角的影响,有利于 PSVR 增益的灵活调整,为参数整定提供参考。

关键词:励磁控制系统;电力系统电压调节器;同步调相机;小干扰稳定性;特征值

中图分类号: TM72 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2020.04.009

0 引言

由于同步调相机的大容量、暂态性能优越等特点,已应用于特高压直流站的快速电压支撑^[1-4]。采用主变高压侧电压控制的电力系统电压调节器(power system voltage regulator, PSVR),可有效改善系统侧的动态电压特性。陈新琪等^[5]分析 PSVR 的工作原理,依据现场试验结果研究发电机 PSVR 在提高机组对系统动态无功支撑中的作用;周晓渊等^[6]在单机无穷大系统上,从特征值和时域仿真两方面进行分析;陈新琪等^[7]利用 PSCAD,仿真分析 PSVR 在六机实际系统中的影响;Nocuchi 等^[8-9]提出了不同形式的发电机高压侧电压控制器的结构和控制策略;石祥建等^[10]分析了大型同步调相机的 PSVR 控制策略。

对于 PSVR 参数整定,陈新琪等^[11]面向常规发电机,提出类似于电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)的参数整定方法,对 PSVR 增益系数的取值考虑电压稳定性,对时间常数的设置考虑对系统功角振荡阻尼的增强,并与 PSS 的阻尼特性协调。

由于调相机仅输出无功功率,不同于发电机,

励磁相关控制环节对机组功角特性的影响要小的多。需通过分析调相机的动态无功电压特性、动态功角特性,进行 PSVR 的参数整定或调整。对 PSVR 相关的电压动态性能分析,现有文献大多采用时域仿真方法^[2-11],尚未见到直接利用大系统电压稳定的特征值分析。

笔者以河南电网新增大容量同步调相机为例,分析调相机的动态特性,提出针对调相机 PSVR 的参数调整方法。调整 PSVR 移相环节时间常数,降低 PSVR 对功角的影响。计算不同系统运行方式、不同调相机无功出力下的电压振荡模式,确定 PSVR 增益系数调整范围,并进行功角振荡模式的核算。为调相机 PSVR 参数整定提供参考。

1 大容量调相机与 PSVR

鉴于 800 kV 特高压直流天中线、青豫线及其他规划线路陆续接入河南电网,于 2019 年在河南邵陵站投运两台隐极式同步调相机以提高对系统动态无功电压的支撑能力。

调相机采用单元接线方式,通过升压变压器接入 500 kV 母线。额定容量 300 Mvar,额定电压

能,因此计算 V_s 变化对 V_T 的影响。

PSVR 参数取实际值: $K_{qv} = 1.2$, $T_{qv} = 0.1$, $T'_{q1} = 0.5$, $T_{q1} = 0.2$,其余参数为 0。

调相机无功出力为 1.0 p.u.。 V_T - V_s 相频特性曲线示于图 4,最大相移 51.8° 。

幅频特性体现 V_s 变化对 V_T 的影响,属于正常的电压无功关系,未给出。图 4 的相频特性体现系统电压 V_s 变化对 \dot{V}_T 的幅角的影响,电压幅角的变化将影响到调相机有功功率的波动,当然影响到功角稳定特性。

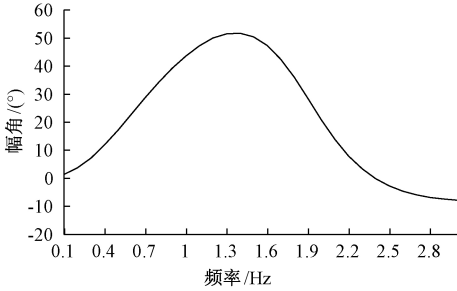


图 4 含 PSVR 的调相机 V_T - V_s 相频特性

Figure 4 V_T - V_s phase frequency characteristic of the condenser employing PSVR

相频特性值越小,对有功功率、功角稳定特性的影响也越小。为描述方便,计算相频特性曲线的均方根:

$$\theta_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta_i^2}, \quad (16)$$

本文中, $N = 30$ 。图 4 中相频特性的均方根为 36.182 6。

本文中调相机 PSVR 时间常数的调整目标就是最小化相频特性曲线的均方根:

$$\min \theta_{\text{RMS}}. \quad (17)$$

3 PSVR 参数调整与特征值计算

对调相机而言,由于有功出力为 0,其动态电压无功特性、功角特性不同于常规发电机。2.1 节的分析说明,调相机无功出力变化对转子转矩的影响几乎可略去;2.2 节的分析说明,由于控制环节的作用,电压幅值的变化会一定程度影响到电压幅角和调相机的功角特性。

在调相机上采用 PSVR 的目的是改善电压 V_T 的动态性能。PSVR 参数调整应针对调相机电压稳定特性,但同时兼顾功角稳定性。

因此,笔者对 PSVR 参数的调整,考虑 4 个方面内容。

(1)PSVR 时间常数调整:通过调相机的相频特性,按式(16)、(17)调整 PSVR 移相环节的时间常数,减小对调相机功角特性的影响。

(2)PSVR 增益系数调整:通过全网小干扰稳定特征值计算,保证调相机相关电压振荡模式的稳定性和阻尼比,确定 PSVR 增益系数的取值上限。

(3)功角振荡模式校核:同样是通过全网小干扰稳定特征值计算,保证调相机相关功角振荡模式的稳定性和阻尼比,校核或进一步调整 PSVR 增益系数的取值上限。

(4)考虑多种运行方式:分别在河南电网峰、平、谷 3 种典型运行方式以及调相机不同无功出力下,计算系统稳定性,调整 PSVR 增益系数上限值。

有关河南电网的小干扰稳定特征值计算,利用 PSASP 中导出的数据、本课题组多年来编写的计算程序^[13-14]进行。计算环境为 Intel Visual Fortran Composer XE 2011,8 线程并行计算。

对于机电振荡模式,计算状态变量中各发电机功角、转速的参与因子,利用参与因子计算各模式的机电相关比,确定调相机参与的机电振荡模式以及各模式中的各发电机参与度,不再赘述。

对于电压振荡模式,计算状态变量中各发电机电势的参与因子,利用参与因子计算各模式的电压相关比,确定调相机参与的电压振荡模式以及各模式中的各发电机参与度。

4 PSVR 参数调整算例

4.1 PSVR 时间常数调整

在初始 PSVR 参数下,图 4 中相频特性的均方根为 36.182 6。调整 PSVR 其余两个移相环节的时间常数值,改变相频特性曲线。当 $T'_{q2} = 0.1$, $T_{q2} = 0.7$, $T'_{q3} = 0.1$, $T_{q3} = 0.8$ 时,调相机 V_T - V_s 相频特性曲线如图 5 所示,最大相移 18.6° ,相频特性的均方根由原来的 36.182 6 下降为 12.761 7,降低了无功电压对功角特性的影响。

4.2 调相机相关的电压振荡模式

平运行方式下,不计 PSVR,河南电网 94 台发电机,1 736 个特征值。与调相机相关的电压振荡模式有 4 个,列于表 1,振荡频率分别为 0.67、0.87、0.75、0.17 Hz,后 3 个模式中未列出参与度更小的机组。

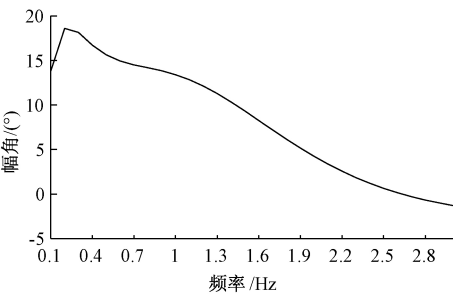


图 5 调整 PSVR 时间常数后的调相机 V_T - V_s 相频特性

Figure 5 V_T - V_s phase frequency characteristic of the condenser with PSVR time constants adjusted

表 1 与调相机相关的电压振荡模式
Table 1 Voltage oscillation modes relevant to condensers

模式号	特征值	参与度	发电机名称
12	$-9.675\ 6+j4.235\ 9$	0.501 4	豫邵陵 2G
		0.498 6	豫邵陵 1G
		0.358 0	豫邵陵 1G
23	$-9.198\ 9+j4.697\ 4$	0.355 4	豫邵陵 2G
		0.017 6	豫龙丰 1G
		0.924 2	豫龙岗 1G
49	$-13.496\ 1+j5.482\ 5$	0.002 6	豫邵陵 1G
		0.002 6	豫邵陵 2G
		0.264 3	豫邵陵 2G
54	$-59.759\ 5+j1.064\ 7$	0.264 3	豫邵陵 1G
		0.117 7	豫万方 5G

共 3 种类型:①模式 12,为调相机之间的无功电压振荡模式;②模式 23、54,调相机为主,其他机组参与的振荡模式;③模式 49,其他机组为主,调相机参与的振荡模式。

4.3 PSVR 增益系数调整

(1)平运行方式下的 K_{qv} 上限。在河南电网平运行方式下,PSVR 的时间常数采用 4.1 节确定的值,增益系数 K_{qv} 从-0.6 开始逐渐增大,计算系统的特征值,利用参与因子确定与调相机相关的电压振荡模式。最终结果列于表 2。

表 2 平运行方式下 $K_{qv}=24$ 时调相机相关电压模式
Table 2 Voltage oscillation modes relevant to condensers under the flat-operation mode with $K_{qv}=24$

模式号	特征值实部	特征值虚部	第一参与机组
14	-9.675 4	4.236 1	豫邵陵 1G
26	-8.627 6	5.169 6	豫邵陵 2G
27	-9.670 4	9.798 3	豫新密二期 1G
48	-13.296 0	5.354 5	豫龙岗 1G
60	-59.759 3	1.063 4	豫邵陵 2G
89	-0.391 7	1.921 5	豫姚孟 3G

当 K_{qv} 为 0 时,调相机仅参与 4 个振荡模式,见表 1。随着增益系数变化,调相机参与的振荡

模式数变多。当 K_{qv} 从 0 逐渐增大到 24 时,相关电压振荡模式稳定。增益系数达到 25 时,出现一个正实部特征值,不稳定。因此,平运行方式下, K_{qv} 应不大于 24。

(2)峰运行方式下的 K_{qv} 上限。在峰运行方式下,电网有 129 台发电机,2 381 个特征值。当 K_{qv} 从 0 逐渐增大到 67 时,相关电压振荡模式稳定,列于表 3; K_{qv} 达到 68 时,不稳定。

峰运行方式下, K_{qv} 应不大于 67。该值大于平运行方式下的 24,可能是由于全网发电机的增多,调相机的影响相对变小。

表 3 峰运行方式下 $K_{qv}=67$ 时调相机相关电压模式
Table 3 Voltage oscillation modes relevant to condensers under the peak-operation mode with $K_{qv}=67$

模式号	特征值实部	特征值虚部	第一参与机组
3	-11.324 0	11.534 8	豫华豫 3G
17	-9.675 4	4.236 0	豫邵陵 2G
51	-13.367 9	5.153 1	豫龙岗 1G
88	-14.558 8	15.099 5	豫华豫 4G
103	-2.169 5	9.389 5	豫龙岗 1G
104	-9.413 0	9.453 6	豫新密二期 1G
114	-0.387 2	1.935 1	豫姚孟 3G
116	-43.929 2	2.855 7	豫登封 4G
118	-9.705 8	9.978 1	豫新密二期 1G
128	-5.095 2	4.082 0	豫华豫 4G

(3)谷运行方式下的 K_{qv} 上限。谷运行方式下,电网有 64 台发电机,1 220 个特征值。当 K_{qv} 从 0 逐渐增大到 19.4 时,相关电压振荡模式稳定,列于表 4; K_{qv} 达到 19.5 时,不稳定。

谷运行方式下, K_{qv} 应不大于 19.4。该值小于其他两种运行方式下的值,可能是由于全网发电机的减少,调相机的影响相对变大。

表 4 谷运行方式下 $K_{qv}=19.4$ 时调相机相关电压模式
Table 4 Voltage oscillation modes relevant to condensers under the valley-operation mode with $K_{qv}=19.4$

模式号	特征值实部	特征值虚部	第一参与机组
10	-9.675 4	4.236 0	豫邵陵 1G
19	-9.811 1	9.917 8	豫新密二期 1G
20	-8.704 5	3.985 5	豫邵陵 2G
36	-2.185 9	9.315 2	豫悦华 1G
39	-13.467 0	5.566 8	豫龙岗 1G
50	-17.765 1	5.229 7	豫隆达电厂 1G
54	-17.796 8	1.175 2	豫隆达电厂 1G
67	-6.253 0	1.927 6	豫内乡 1G

4.4 K_{qv} 变化对功角振荡模式的影响

平运行方式下,两台调相机无功出力均为 1 p.u.。PSVR 的时间常数采用 4.1 节确定的值,

增益系数 K_{qv} 分别取 0、10、20、50、100,与调相机相关的功角振荡模式列于表 5。

表 5 不同 K_{qv} 取值下的调相机相关功角振荡模式
Table 5 Power angle oscillation modes relevant to condensers under different K_{qv} values

K_{qv}	模式号	特征值 实部	特征值 虚部	第一 参与机组
0	10	-2.412 2	9.865 6	豫棉山 2G
	11	-2.595 9	9.775 4	豫邵陵 2G
	15	-2.680 5	9.818 5	豫邵陵 1G
10	10	-2.380 4	9.833 6	豫棉山 2G
	16	-2.680 8	9.819 1	豫邵陵 1G
	17	-2.602 9	9.780 0	豫邵陵 2G
20	14	-2.405 1	9.858 1	豫棉山 2G
	17	-2.601 7	9.784 7	豫邵陵 2G
	18	-2.680 4	9.818 3	豫邵陵 1G
50	12	-2.597 9	9.783 3	豫邵陵 1G
	14	-2.390 3	9.848 7	豫棉山 2G
	15	-2.680 5	9.818 5	豫邵陵 2G
100	10	-2.640 9	9.806 5	豫邵陵 2G
	12	-2.400 9	9.884 5	豫棉山 2G
	14	-2.638 5	10.875 5	豫邵陵 1G

由表 5 可知,PSVR 增益系数变化对调相机功角振荡模式有影响,但不大。

4.5 调相机无功出力变化对功角振荡模式的影响

不计 PSVR,两台调相机无功出力相等,分别取值 0、1、3 p.u.,计算系统特征值,与调相机相关的功角振荡模式列于表 6。其中,无功出力为 1、3 p.u.时,调相机参与了其他更多的振荡模式,未在表 6 中列出。

表 6 调相机不同无功出力下的功角振荡模式
Table 6 Power angle oscillation modes under different reactive power outputs of condensers

$Q/\text{p.u.}$	模式号	特征值 实部	特征值 虚部	第一 参与机组
0	10	-2.968 5	8.073 3	豫邵陵 1G
	11	-2.907 7	8.088 0	豫邵陵 2G
1	16	-2.645 4	9.798 5	豫邵陵 2G
	18	-2.629 8	10.862 2	豫邵陵 1G
3	12	-2.495 2	9.985 0	豫邵陵 2G
	16	-2.136 7	12.085 6	豫邵陵 1G

因此,无功出力变化对特征值实部有一定影响,随无功出力增加,阻尼有所下降;但对虚部影响较大,例如,由空载时的 8.073 3 到满载时的 12.085 6。

4.6 分析

(1)单机无穷大模型下,调相机无功出力变化对转子转矩的影响几乎可略去;但在多机系统下,该影响不可略去,需在调整 PSVR 参数时考虑。

(2)合理调整 PSVR 移相环节的时间常数,可降低 PSVR 对功角振荡模式的影响。

(3)过大的 PSVR 增益系数,会导致调相机更大程度地参与其他振荡模式,以及调相机电压振荡模式的不稳定。

(4)确定 PSVR 增益系数上限值时,需考虑多种系统运行方式。

(5)河南电网邵陵站调相机的 PSVR 增益系数值不宜超过 19.4。

5 结论

以河南电网新增的大容量同步调相机为例,从调相机动态特性和小干扰稳定性角度提出调相机 PSVR 参数调整方法。与发电机相比,调相机的无功电压对功角的影响要小得多,但仍需校核;通过调整 PSVR 移相环节时间常数,降低 PSVR 对调相机功角特性的影响;计算多系统系统运行方式下的电压振荡模式,结合功角振荡模式,确定 PSVR 增益系数调整范围。

参考文献:

[1] 王雅婷,张一驰,周勤勇,等.新一代大容量调相机在电网中的应用研究[J].电网技术,2017,41(1): 22-28.

[2] 崔挺,沈阳武,张斌,等.300 Mvar 级同步调相机对湖南电网稳定的影响研究[J].湖南电力,2016,36(3):1-4,8.

[3] 赵一琰,华文,邓晖,等.调相机接入对浙江电网的影响研究[J].浙江电力,2018,37(1):8-12.

[4] 蔡晖,张文嘉,祁万春,等.调相机接入江苏电网后的适应性研究[J].电力电容器与无功补偿,2017,38(2):23-27.

[5] 陈新琪,俞鸿飞,卢嘉华,等.电力系统电压调节器原理及试验分析[J].电力系统自动化,2012,36(3):92-96.

[6] 周晓渊,邱家驹,陈新琪.高压侧电压控制对单机-无穷大系统稳定性的影响[J].中国电机工程学报,2003,23(1):60-63.

[7] 陈新琪,秦刚华,杨敏,等.基于 PSCAD 的电力系统电压调节器仿真分析[J].中国电力,2019,52(3):81-86,139.

[8] NOGUCHI S, SHIMOMURA M, PASERBA J. Improvement to an advanced high side voltage control [J].

IEEE transactions on power systems, 2006, 21 (2) : 683-692.

[9] DONG Y P, XIE X R, ZHOU B R, et al. An integrated high side var-voltage control strategy to improve short-term voltage stability of receiving-end power systems [J]. IEEE transations on power systems, 2015, 31 (3) : 1-11.

[10] 石祥建, 牟伟, 韩焦, 等. 大型同步调相机控制策略研究 [J]. 中国电力, 2017, 50 (12) : 44-50.

[11] 陈新琪, 陈皓, 竺士章. 电力系统电压调节器参数整定 [J]. 中国电力, 2004, 37 (7) : 12-15.

[12] 张振, 刘艳红. 基于特征值的单机无穷大电力系统随机稳定性分析 [J]. 郑州大学学报 (工学版), 2018, 39 (4) : 58-63.

[13] 罗丹, 王克文, 王君亮. 小干扰稳定分析中状态矩阵的快速形成 [J]. 电测与仪表, 2015, 52 (10) : 56-60, 91.

[14] 康礼彦, 王克文, 王君亮. 电网电力系统稳定器的交互影响分析 [J]. 自动化仪表, 2013, 34 (8) : 5-8.

PSVR Parameters Adjustment on Large Capacity Synchronous Condensers

CHEN Qiang¹, WANG Hua¹, WANG Kewen², LIU Yanhong²

(1. Electric Power Company Research Institute, State Grid Henan Electric Power, Zhengzhou 450000, China; 2. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The large capacity synchronous condenser equipped with power system voltage regulator PSVR could provide effective transient voltage support for UHV DC transmission. Taking two new large capacity synchronous condensers in Henan power grid as an example, PSVR parameters were adjusted from the point of view of condenser dynamic characteristics and small disturbance stability. The influence of condenser reactive power output and PSVR parameters on voltage characteristics and power angle characteristics was analyzed, and a approach for adjusting PSVR parameters was proposed. Time constants in PSVR phase shifting segments were adjusted to minimize the root mean square of voltage amplitude angle characteristic curve. Voltage oscillation modes relevant to condensers were determined by the eigenvalue calculation of small disturbance stability on whole system. According to voltage oscillation mode sunder different system operation modes and different condenser reactive power outputs, and combining with power angle oscillation mode check calculation, the adjustment ranges of PSVR gain coefficients were determined. The presented approach could reduce the influence of PSVR on power angle, facilitate the flexible adjustment of PSVR gain, and provide reference for parameter tuning.

Key words: excitation control system; power system voltage regulator (PSVR); synchronous condenser; small disturbance stability; eigenvalue