

基于反馈线性化的超导磁储能 装置控制器研究

彭晓涛,程时杰,王少荣,唐跃进

(华中科技大学 电气与电子工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要: 以含超导磁储能 SMES(Superconducting Magnetic Energy Storage)装置的单机无穷大电力系统为研究对象,建立了其非线性数学模型。在此模型基础上,提出了一种基于反馈线性化方法和线性最优控制理论的 SMES 控制规律的简便设计方法。一个重要的特点是:在所构成的线性系统中,通过坐标变换引入了发电机机端电压,因此,可以方便地实现使用 SMES 同时对系统的功角和电压稳定进行控制。仿真结果表明该控制器对改善系统的阻尼特性和提高系统的电压稳定性都具有良好的控制效果,同时也验证了该控制器的可行性。

关键词: 超导磁储能; 反馈线性化; 最优控制; 稳定性; 电压调节

中图分类号: TM 917; TM 712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2006)06-0005-04

0 引言^[1-11]

超导磁储能 SMES(Superconducting Magnetic Energy Storage)装置是以直接利用超导磁体本身存储能量为手段的一种超导电力装置,它的正常工作和有效利用是需要相应的控制策略来保证的。在实际应用中,SMES 的控制一般分为外环控制和内环控制 2 个层次,其中外环控制器是系统的主控制器,用于根据系统的需求,向内环控制提供所需要的有功和无功功率给定值,而内环控制器则负责对 SMES 的变流器开关元件进行触发控制,以按照外环控制的要求,对被控对象进行有功和无功功率的四象限调节。

本文以含 SMES 的单机无穷大电力系统作为研究对象,通过坐标变换和引入虚拟反馈把原非线性系统转换为完全可控的线性系统,同时,在所构造的线性系统中,通过坐标变换将发电机机端电压引入此线性系统,最后针对该线性系统设计了一种易于实现的简便的 SMES 最优控制规律。仿真结果证明,所设计控制规律是可行的,它不仅可以有效地改善电力系统的动态特性,而且还可以提高系统的电压稳定性。该控制装置样机和 SMES 系统的研制和实验工作正在进行中,本文的重点在于介绍作者研究控制装置的控制策略。

1 含 SMES 的电力系统模型

1.1 SMES 模型

图 1 为 SMES 与电力系统连接的等效原理图。如图所示,由于 SMES 主要由连接变压器、变流器和

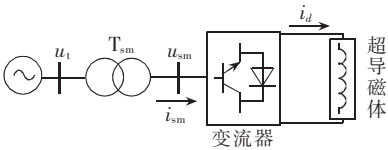


图 1 SMES 与系统的等效连接
Fig.1 Equivalent connection of SMES and power system

超导磁体等 3 部分组成,因此其数学模型的建立在很大程度上取决于它采用的变流器的结构和控制方式。根据 SMES 接入电力系统时采用变流器拓扑结构的不同,可将 SMES 分为电流源型 SMES 和电压源型 SMES 2 种,这 2 种 SMES 的主要工作原理也存在明显的差别。对于电流源型 SMES,通过调节变流器输入电流 i_{sm} 的幅值以及其与接入点电压 u_1 的相位关系,可实现 SMES 对有功和无功功率的调节;而对于电压源型 SMES,则是通过调节变流器输入电压 u_{sm} 及它在系统接入点处电压 u_1 的幅值和相位关系,实现 SMES 对有功和无功功率的调节。但是,2 种类型 SMES 在实质上最终都是通过对其产生的有功和无功功率进行解耦控制,从而实现在四象限范围内独立调节其对系统注入有功和无功功率的,因此可以采用如下二阶动态模型描述 SMES 的功率调节特性^[10]:

$$\dot{P}_{sm} = -P_{sm} / \tau + u_1 / \tau \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{sm} = -Q_{sm} / \tau + u_2 / \tau \quad (2)$$

其中, u_1, u_2 为 SMES 外环控制器输出的给定有功和无功功率控制量,两者在内环控制器中的物理实现将决定于变流器的结构和控制方式,在电流源型 SMES 中可将它映射成变流器 PWM 控制的脉宽调制比和导通触发角。 τ 为 SMES 的惯性时间常数。 P_{sm}, Q_{sm} 为 SMES 和系统之间交换的实际有功和无功

功率。而 SMES 与系统的接口方程可用式(3)表示:

$$\begin{aligned} P_{sm} &= u_d i_{sd} + u_q i_{sq}, & Q_{sm} &= u_q i_{sd} - u_d i_{sq} \\ i_{Ld} &= i_d - i_{sd}, & i_{Lq} &= i_q - i_{sq} \end{aligned} \quad (3)$$

式中 u_d, u_q 为 SMES 接入点的 d 轴和 q 轴电压; i_d, i_q 为发电机的 d 轴和 q 轴电流; i_{sd}, i_{sq} 为 SMES 向系统输入的 d 轴和 q 轴电流; i_{Ld}, i_{Lq} 为系统输电线路的 d 轴和 q 轴电流。

1.2 含 SMES 的电力系统模型

图 2 所示为具有 SMES 控制的单机无穷大电力系统,其中 SMES 安装在靠近发电机输出电压母线侧。

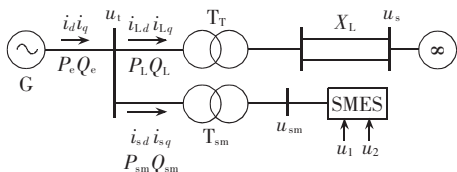


图 2 含 SMES 的单机无穷大系统

Fig.2 A single-machine infinite-bus power system with SMES unit

由图可知,SMES 接入点处的系统功率满足:

$$P_{sm} = P_e - P_L \quad (4)$$

$$Q_{sm} = Q_e - Q_L \quad (5)$$

式中 P_e, Q_e 为发电机输出的有功和无功功率; P_L, Q_L 为系统传输线的有功和无功功率。

对式(4)求导,并代入式(1),经整理得:

$$\dot{P}_e = -P_{sm} / \tau + u_1 / \tau + \dot{P}_L \quad (6)$$

式(6)给出了一种 SMES 有功功率控制规律,同时也间接说明了可通过对 SMES 和系统之间交换有功功率的控制,来提高系统的动态稳定性。

根据以上分析结果,可用如下非线性微分方程组描述含 SMES 电力系统的动态特性:

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} &= \omega_0 (P_m - P_e - P_D) / H \end{aligned} \quad (7)$$

$$\dot{P}_{sm} = -P_{sm} / \tau + u_1 / \tau$$

式中 δ 为转子的 q 轴与 u_s 之间的夹角; ω 为发电机的转子角速度; ω_0 为系统的同步角速度; H 为发电机转子惯性时间常数; P_m 为发电机机械功率; P_D 为发电机的阻尼功率。

图 2 中的 SMES 虽然通过变压器与发电机连接,但考虑到 SMES 与系统进行功率交换时,为减少连接变压器上的功率损耗,该变压器通常采用低损耗指标进行设计,因此正常工作时,可忽略其电阻和横向电压偏移,这样发电机机端电压可近似表示为

$$u_{sm} = u_1 - Q_{sm} X_{sm} / u_{sm} \quad (8)$$

同理,对上式求导,并代入式(2),经整理得:

$$\dot{u}_1 = -\frac{X_{sm} Q_{sm}}{\tau u_{sm}} + \frac{X_{sm} u_2}{\tau u_{sm}} + 2 \dot{u}_{sm} - \frac{\dot{u}_{sm} u_1}{u_{sm}} \quad (9)$$

式中 u_1 为发电机机端电压; u_{sm} 为 SMES 的交流输入电压; X_{sm} 为 SMES 和系统连接变压器 T_{sm} 的等效电抗。

式(9)同样反映了一种 SMES 的无功控制规律,同时也说明了可通过对 SMES 和系统之间交换无功功率的调节实现对其接入点电压的调节。

2 SMES 控制器设计

将式(7)所示的非线性系统转化化为式(10)表示的标准仿射型非线性系统:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= f(x) - g(x) u \\ f(x) &= \begin{bmatrix} \omega - \omega_0 \\ \omega_0 (P_m - P_e - P_D) / H \\ -P_{sm} / \tau \end{bmatrix}, & g(x) &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 / \tau \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

为提高系统的动态特性,同时为了使控制系统更便于实现,确定上述系统的输出函数为^[12]

$$y = h(x) = \Delta \omega$$

再根据基于微分几何的非线性系统全局线性化的设计方法,通过选取以下一组坐标变换形式^[13]:

$$\begin{aligned} Z_1 &= \delta - \delta_0 = \Delta \delta, & Z_2 &= \omega - \omega_0 = \Delta \omega \\ Z_3 &= \omega_0 (P_m - P_e) / H = -\omega_0 \Delta P_e / H \end{aligned} \quad (11)$$

同时,在忽略发电机阻尼转矩作用的情况下,可以将原非线性系统变换为式(12)所示的线性系统。

$$\begin{aligned} \Delta \dot{\delta} &= \Delta \omega, & \Delta \dot{\omega} &= -\omega_0 \Delta P_e / H \\ \Delta \dot{P}_e &= -H u / \omega_0 \end{aligned} \quad (12)$$

式中 u 为在线性空间中的控制量。

由于发电机机端电压的调节精度可以在其运行点小范围内讨论,并利用泰勒级数展开方法将发电机端电压表示成如下形式:

$$R_u \Delta U_1 = \Delta P_e - S_u \Delta \delta \quad (13)$$

式(13)将机端电压的偏差 ΔU_1 引入式(12)表示的线性系统,提供了利用 SMES 同时实现对发电机机端电压控制的可能性。

将式(13)代入式(12),经过推导,消去中间状态 $\Delta \delta$,可将式(12)表示的线性系统转换为式(14)所示的线性系统。

$$\begin{aligned} \Delta \dot{\omega} &= -\omega_0 \Delta P_e / H, & \Delta \dot{P}_e &= -H u / \omega_0 \\ \Delta \dot{U}_1 &= -S_u \Delta \omega / R_u - H u / (\omega_0 R_u) \end{aligned} \quad (14)$$

对式(14)中虚拟控制量 u 的获取,存在多种设计方法,本文则采用线性最优控制原理对其进行求解。根据线性最优控制原理,最优控制应该为状态量的线性组合,如下式所示:

$$u = k_1 \Delta \omega + k_2 \Delta P_e + k_3 \Delta U_1 \quad (15)$$

式(15)中的参数可用如下方法求取,将系统式(14)写成矩阵形式:

$$\dot{X} = A X + B U \quad (16)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\omega_0}{H} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -\frac{S_u}{R_u} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{H}{\omega_0} \\ -\frac{H}{\omega_0 R_u} \end{bmatrix}$$

$$X = [\Delta \omega \quad \Delta P_e \quad \Delta U_1]^T, \quad U = u$$

求解相应的 Riccati 方程,可得到线性最优矩阵解 $\mathbf{P}^*$ 。关于 Riccati 方程的求解,可以参考有关线性最优控制的参考文献,这里不赘述。本文利用 Matlab 中的 $[X, L, G, RR] = \text{care}[A, B, Q]$ 函数对 $\mathbf{P}^*$ 自动求解。将求得的 $\mathbf{P}^*$ 代入式(15),即可求得式(13)中的参数 k_1, k_2 和 k_3 。

$$[k_1 \ k_2 \ k_3]^T = \mathbf{B}^T \mathbf{P}^* \tag{17}$$

最后,将式(6)和式(9)的增量方程,分别与式(14)联立,整理可得:

$$u_1 = P_{sm} - \tau \dot{P}_L - H \tau u / \omega_0 \tag{18}$$

$$u_2 = \frac{\tau \dot{U}_{sm} U_i}{X_{sm}} - \frac{\tau U_{sm} H}{\omega_0 R_u X_{sm}} u - \frac{S_u \tau U_{sm}}{X_{sm} R_u} \Delta \omega - Q_{sm} - \frac{2 \tau U_{sm} \dot{U}_{sm}}{X_{sm}} \tag{19}$$

式(18)和式(19)即为本文所设计的 SMES 有功和无功功率的线性最优控制规律。

图 3 为本文设计控制器的原理图,图中 $C(X, u)$ 即为 SMES 的线性最优控制器。

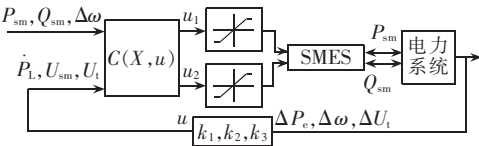


图 3 SMES 的反馈线性化控制器

Fig.3 The feedback linearization controller of SMES

考虑到 SMES 变流器的功率器件和超导磁体的额定工作电流和电压,因此在该控制器的输出中设定了 SMES 的有功和无功功率调节限值:

$$P_{sm,max} = 0.5 \text{ p.u.}, \quad Q_{sm,max} = 0.5 \text{ p.u.}$$
$$P_{sm,min} = -0.5 \text{ p.u.}, \quad Q_{sm,min} = -0.5 \text{ p.u.}$$

其中, $P_{sm,max}$ 、 $Q_{sm,max}$ 和 $P_{sm,min}$ 、 $Q_{sm,min}$ 分别为 SMES 输入、输出有功和无功功率的最大、最小值。由于 SMES 装设在发电机输出母线侧,则式中 P_{sm} 、 Q_{sm} 、 $\dot{P}_L$ 、 U_{sm} 、 U_i 、 ΔP_e 和 $\Delta \omega$ 均为局部可测量量或可由测量导出的量,这使本控制规律具有较好的工程实用性。

3 仿真结果

用 Matlab 中的 Simulink 软件包和 PSB 工具箱建立了图 2 所示具有 SMES 的单机无穷大电力系统仿真模型。系统的发电机、励磁系统和 SMES 的仿真参数参见文献[11]。

系统稳定运行在 $P_0 = 0.8 \text{ p.u.}$ 的情况下,平行双回线的一条上路因故障发生断路,3 s 后系统重新恢复双回线运行。图 4 是给出发电机转子功角和机端电压的响应曲线,同时还给出具有 SMES 的系统在故障情况下,SMES 的有功和无功功率输出曲线。对比图 4(a)和(b)可以看出,没有使用 SMES 的系统在此大扰动下,系统很快发生发电机失步和机端电压剧烈振荡的现象。而具有本文所设计控制器的 SMES,系统在故障后,却能够在约 1 s 时间内快速抑制系统中出现的转子功角振荡和机端电压波动。

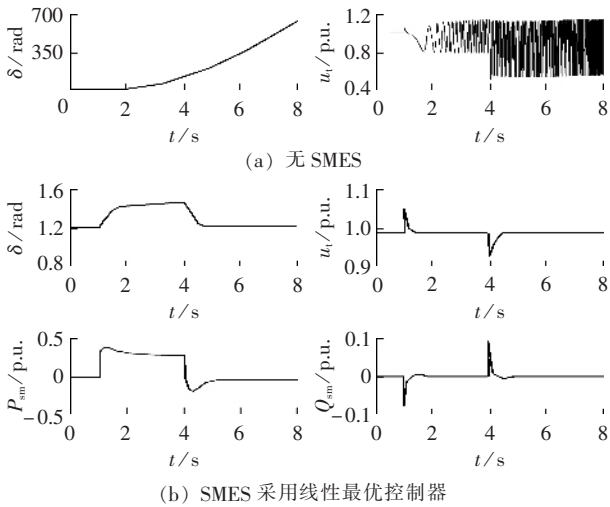


图 4 系统在传输线故障下的响应 ($P_0 = 0.8 \text{ p.u.}$)
Fig.4 The system response to transmission line fault ($P_0 = 0.8 \text{ p.u.}$)

图 5 给出系统运行在 $P_0 = 0.8 \text{ p.u.}$ 情况下,当传输线发生三相对地短路故障,且 0.1 s 后故障消除时响应曲线。图 5(a)表明,无 SMES 控制时,系统功角和机端电压在扰动后失稳,且由于系统阻尼较弱,使系统摇摆失稳状态不能迅速抑制;而图 5(b)说明,对使用 SMES 的系统,其功角和机端电压在故障后都能迅速恢复稳定运行。仿真结果说明,所设计的控制器对利用 SMES 增加系统传输稳定极限和改善系统阻尼特性及提高机端电压稳定性都有显著效果。

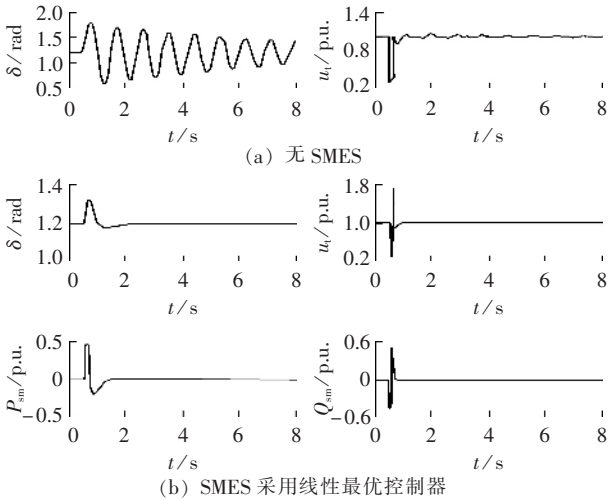


图 5 系统在短路故障下的响应 ($P_0 = 0.8 \text{ p.u.}$)
Fig.5 The system response to short circuit fault ($P_0 = 0.8 \text{ p.u.}$)

4 结语

本文首先以含 SMES 的单机无穷大电力系统为研究对象,建立了系统的详细非线性数学模型。针对该模型,利用反馈线性化的方法建立了反映系统动态特性的线性化模型,在此基础上引入发电机机端电压调节特性的模型。在所建立的模型上,采用线性最优控制理论设计了 SMES 的有功和无功功率的控制规律。仿真结果不仅验证了所设计控制规律的可

行性,而且说明该控制器可满足同时改善电力系统动态性能和提高电压调节精度的要求,同时由于所提设计方法简单,因此具有较好的工程实用性。

参考文献:

- [1] 杨勇. 超导技术的发展及其在电力系统中的应用[J]. 电网技术,2001,25(9):48-60.
YANG Yong. Developing of the superconduction technology and its applications in the power system[J]. Power System Technology,2001,25(9):48-60.
- [2] 肖立业. 超导电力技术的现状和发展趋势[J]. 电网技术,2004,28(9):33-37.
XIAO Li-ye. Present station and development trend of superconducting power technology[J]. Power System Technology,2004,28(9):33-37.
- [3] 陈利军,马维新,冯之鑫. 超导储能装置改善电力系统动态性能的研究[J]. 清华大学学报:自然科学版,1999,39(3):14-18.
CHEN Li-jun,MA Wei-xin,FENG Zhi-xin. Study of SMES to improve dynamics of power system[J]. Journal of Tsinghua University:Science and Technology,1999,39(3):14-18.
- [4] TAN Y L,WANG Y Y. Augmentation of transient stability using a superconducting coil and adaptive nonlinear control[J]. IEEE Trans on Power Systems,1998,13(2):361-365.
- [5] 周双喜,吴畏,吴俊玲,等. 超导储能装置用于改善暂态电压稳定性的研究[J]. 电网技术,2004,28(4):1-5.
ZHOU Shuang-xi,WU Wei,WU Jun-ling,et al. Application of superconducting magnetic energy storage to improve transient voltage stability[J]. Power System Technology,2004,28(4):1-5.
- [6] 侯勇,蒋晓华,姜建国. 基于超导储能的综合电能质量调节装置及其控制策略[J]. 电力系统自动化,2003,27(21):49-53.
HOU Yong,JIANG Xiao-hua,JIANG Jian-guo. SMES based unified power quality conditioner and control strategy[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(21):49-53.
- [7] 刘逊,朱晓光,褚旭. 基于超导储能的瞬时电压跌落补偿[J]. 电力系统自动化,2004,28(3):40-44.
LIU Xun,ZHU Xiao-guang,CHU Xu. Voltage sag compensation by SMES[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(3):40-44.
- [8] 余江,段献忠. 旋转空间矢量算法在电压型 SMES 控制中的应用[J]. 电力系统自动化,2002,26(21):39-44.
YU Jiang,DUAN Xian-zhong. Rotating space vector control algorithm of superconducting magnetic energy storage(SMES)[J].

Automation of Electric Power Systems,2002,26(21):39-44.

- [9] WU C J,LEE Y S. Application of superconducting magnetic energy storage unit to improve the damping of synchronous generator[J]. IEEE Trans on Energy Conversion,1991,6(4):573-578.
- [10] 关天祺,梅生伟,卢强,等. 超导磁储能装置的非线性鲁棒控制器的设计[J]. 电力系统自动化,2001,25(17):1-6.
GUAN Tian-qi,MEI Sheng-wei,LU Qiang,et al. Nonlinear robust control design for power system including superconducting magnetic energy storage devices [J]. Automation of Electric Power Systems,2001,25(17):1-6.
- [11] 彭晓涛,程时杰,王少荣,等. 非线性 PID 控制器在超导磁储能装置中的应用研究[J]. 电网技术,2005,29(5):37-42.
PENG Xiao-tao,CHENG Shi-jie,WANG Shao-rong,et al. Application research on nonlinear PID controller in superconducting magnetic energy storage[J]. Power System Technology,2005,29(5):37-42.
- [12] 陈铁,舒乃秋. 基于直接反馈线性化的非线性励磁控制策略的研究[J]. 电力科学与工程,2005(1):30-31.
CHEN Tie,SHU Nai-qiu. Study of nonlinear excitation based on direct feedback linearization[J]. Electric Power Science and Engineering,2005(1):30-31.
- [13] 孙元璋,黎雄,戴和平,等. 同时改善稳定性和电压精度的非线性励磁控制器[J]. 中国电机工程学报,1996,16(5):332-336.
SUN Yuan-zhang,LI Xiong,DAI He-ping,et al. The nonlinear excitation controller for improving the stability and voltage accuracy[J]. Proceedings of the CSEE,1996,16(5):332-336.
(责任编辑:李玲)

作者简介:

彭晓涛(1971-),男,湖北武汉人,博士研究生,主要从事超导磁储能装置在电力系统中应用的研究(E-mail:whpxt@sina.com);

程时杰(1945-),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,IEEE高级会员,主要从事电力系统的稳定分析与控制、超导和 FACTS 技术在电力系统中的应用、人工智能及其在电力系统中的应用、电力线载波通信等方面的研究;

王少荣(1960-),男,浙江丽水人,副教授,主要从事电力系统运行监控及其自动装置、基于 GPS 的广域测量技术、超导磁储能装置在电力系统中应用等方面的研究;

唐跃进(1958-),男,湖南石门人,教授,博士研究生导师,中国电工技术学会超导应用技术专委会委员,主要从事超导电力应用技术研究。

Study on controller of superconducting magnetic energy storage based on feedback linearization

PENG Xiao-tao,CHENG Shi-jie,WANG Shao-rong,TANG Yue-jin
(Huazhong University of Science & Technology,Wuhan 430074,China)

Abstract: A single-machine to infinite-bus power system with SMES(Superconducting Magnetic Energy Storage) unit is investigated and its nonlinear mathematic model is established. A simple control strategy based on the feedback linearization method and the linear optimal control theory is proposed for the controller of SMES. One of its important features is that,as the generator terminal voltage is introduced into the linearized model of the controlled system by a coordinate transformation,it becomes easier to realize multi-functional control of both power angle and voltage stability. Simulation results show that the proposed controller improves both the damping characteristic and the voltage stability of the power system. At the same time,its feasibility is testified.

This project is supported by the National Basic Research Program of China-973 Program (2004CB217906) and the High Tech Research & Development Program of China(2002AA306331).

Key words: superconducting magnetic energy storage; feedback linearization; optimal control; stability; voltage regulation