

超导磁储能装置的功率控制

袁 田¹, 彭晓涛¹, 王 丹¹, 王达达², 宋 萌²

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072;

2. 云南电力试验研究院(集团)有限公司电力研究院, 云南 昆明 650000)

摘要: 以电流源型和电压源型变流器作为研究对象, 探讨了可对电流源型变流器和电压源型变流器交流侧电流的幅值和相位进行有效控制的 SPWM 开关策略。在此基础上, 研究了能够按照系统要求对 2 种超导磁储能装置进行有功和无功功率调节的功率控制方法。仿真结果表明所研究的功率调节方法能够在四象限内进行超导磁储能装置输入输出有功和无功功率的快速解耦控制, 仿真同时验证了所研究的功率控制策略的正确性和可行性。

关键词: 超导磁储能装置; 储能; 功率控制; 变流器

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.10.021

0 引言

超导磁储能(SMES)是 20 世纪 90 年代发展起来的一种新型储能技术, 主要由超导磁体和功率调节系统(PCS)构成。由于这种储能装置储能效率高, 能够按照系统的要求对有功和无功功率进行独立的四象限快速调节, 可以用于改善电力系统的动态特性, 因此越来越受到电力系统研究人员的关注^[1-5]。为了利用 SMES 在电力系统实现负荷均衡、抑制功率振荡及稳定电压等功能, 需要快速准确地根据电力系统实际需要调节其与 SMES 之间的输入、输出功率。因此, 如何提高 SMES 的四象限快速准确功率调节, 研究与变流器所采用开关策略相适应的 SMES 功率控制方法对于实现其在电力系统的应用具有重要的意义^[6-7]。

根据 PCS 构成变流器的拓扑结构不同, SMES 主要分为电流源型超导磁储能装置(CSMES)和电压源型超导磁储能装置(VSMES)^[8]。其中, CSMES 主要由电流源型变流器 CSC(Current Source Converter)和超导磁体组成; VSMES 主要由电压源型变流器 VSC(Voltage Source Converter)、斩波器和超导磁体组成。由于 SMES 固有的电流源特点, CSC 技术自然适用于 SMES。虽然相关文献指出 SMES 采用 CSC 型 PCS 较 VSC 型 PCS 不仅具有更简洁的主电路, 而且具有更快的功率传输响应和更简洁的控制等特点^[9-11], 但 VSC 作为当前电力电子技术领域的主流发展技术, 由于在可靠性和成熟性方面所具有的优势, 也使得 VSMES 得到了巨大发展^[12-15]。

SMES 的 PCS 作为实现其在电力系统应用的重要接口, 其控制通常分为底层控制和上层控制。PCS 的底层控制主要指变流器的 PWM 控制, 随着可控

型电力电子器件的发展, 变流器的开关控制已由早期的相位调制技术转变为 PWM 技术, 文献[9-11]分别研究了正弦 PWM(SPWM)和优化 PWM 技术在 CSC 中的应用。VSC 的 PWM 技术除了上述 PWM 方法外, 还发展出了基于空间矢量的 SVPWM 技术, 文献[13]基于旋转空间矢量算法进行了 VSMES 控制技术的研究。无论是 VSC 型 PCS 还是 CSC 型 PCS, 其上层控制都用于实现 SMES 的四象限功率双向流动。目前其控制方法主要有直接电流控制、相位调节控制、 dq 坐标系下的解耦控制以及直接功率控制^[14-15]。其中直接电流控制有电流滞环控制、预测电流控制, dq 坐标系下的解耦控制有直接反馈解耦控制、逆系统、反馈线性化等。

本文以 VSMES 和 CSMES 为研究对象, 分别进行了能对其 CSC 调制基波电流和 VSC 调制基波电压的幅值、相位可控的 SPWM 策略研究。在分别明确 CSMES 调节功率与其 CSC 调制基波电流、VSMES 调节功率与其 VSC 调制基波电压的 d, q 轴分量关系的基础上, 通过分别推导 2 种调制策略的调制比和触发角与 CSC 调制基波电流幅值和相位、与 VSC 调制基波电压的 d, q 轴分量的关系, 提出了基于调制比和触发角间接电流控制的 CSMES 功率调节方法, 同时研究了基于 dq 坐标系下电流状态反馈和电压前馈补偿解耦控制的 VSMES 功率调节方法。仿真研究结果表明, 所提出的功率调节方法不仅能够实现 SMES 按照系统要求进行有功和无功功率独立调节, 而且具有良好的动态控制性能, 能够达到提高 SMES 功率响应特性的目的。

1 SMES 功率调节的工作原理

图 1 所示为一个六脉冲 CSMES 装置的基本结构原理图, 它由六脉冲 CSC 和超导磁体构成。整个装置经变压器与电网连接, 其 PCS 控制器利用适当的控制算法, 根据 SMES 的实际调节功率、超导磁体

收稿日期: 2012-07-16; 修回日期: 2013-07-02

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(51190104)

Project supported by the Major Program of the National Natural Science Foundation of China(51190104)

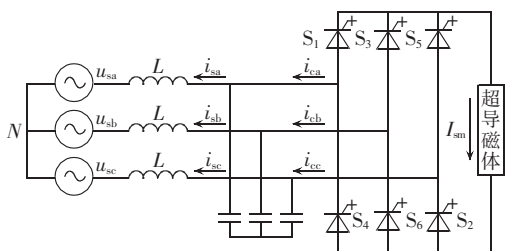


图 1 CSMES 的主电路拓扑结构图

Fig.1 Topological structure of CSMES main circuit

中流过的直流电流 I_{sm} 以及给定的功率参考值,确定变流器的触发脉冲信号,通过调节 CSC 的开关状态,以改变其交流侧输入或输出相电流 i_{ca} 、 i_{cb} 、 i_{cc} 的幅值和相位,从而控制 SMES 的输入或输出有功和无功功率能够准确跟踪给定的有功和无功功率参考值 P_r 和 Q_r 。

图 2 所示为六脉冲 VSMES 装置的基本结构原理图,它主要由 PCS 和超导磁体构成,而 PCS 主要由六脉冲 VSC 和二象限斩波器组成。整个装置经变压器与电网连接,其 PCS 控制器利用适当的控制算法,根据 SMES 的实际调节功率、VSC 直流侧电压 U_{dc} 以及给定的功率参考值,确定变流器的触发脉冲信号,通过调节 VSC 的开关状态,以改变其交流侧各相电压 u_{ca} 、 u_{cb} 、 u_{cc} 的幅值和相位,从而控制 SMES 的输入或输出有功和无功功率能够准确跟踪给定的有功和无功功率参考值 P_r 和 Q_r 。由于 VSC 调节功率将导致其直流侧电压 U_{dc} 的变化,因此需要通过对斩波器进行有效控制,实现 SMES 对 U_{dc} 的恒定电压补偿控制。当 VSC 吸收功率时,通过将 S_8 导通,同时调制 S_7 的开关状态,以实现超导磁体的储能和直流电压的恒定;当 VSC 向系统输出功率时,通过将 S_7 关断,同时调制 S_8 的开关状态,以实现超导磁体的释能和直流电压的恒定。

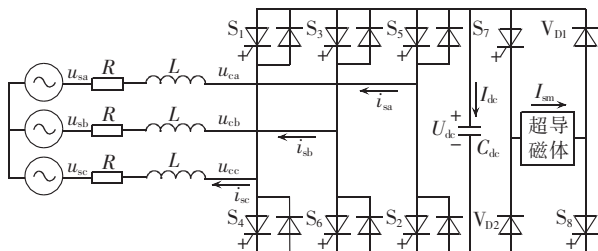


图 2 VSMES 的主电路拓扑结构图

Fig.2 Topological structure of VSMES main circuit

2 CSMES 的功率控制

2.1 CSC 的 SPWM

根据 CSMES 的功率调节原理可知,由于图 1 所示 CSMES 的磁体电流 I_{sm} 不能突变,可以在各触发控制周期内认定其为一个恒流源,因此对 SMES 进行功率调节的目的就是按照给定 P_r 和 Q_r ,通过有效

的开关控制策略来动态调节 CSC 交流侧基波电流的幅值和相位。

文献[9]在文献[10]的基础上,提出了一种适用于 CSC 的改进 SPWM 控制策略。它利用三角载波和正弦调制波信号产生 $P_1—P_7$ 7 个调制脉冲信号,并根据由变流器交流侧目标电流的相位所确定的触发模式信号 mod,确定变流器各开关器件的触发脉冲 $P_{S1}—P_{S6}$ 。通过该脉冲调制策略下 CSC 输入或输出电流的基波分量分析可知,采用该触发控制策略,CSC 交流侧电流基波分量的幅值和相位可由式(1)表示^[16]:

$$\begin{cases} I_s = \frac{\sqrt{3}}{2} M I_{sm} \\ \phi_s = \alpha \end{cases} \quad (1)$$

其中, M 为调制波的幅值; α 为 CSC 调制电流 i_{ca} 、 i_{cb} 和 i_{cc} 基波分量与电网各相电压 u_{sa} 、 u_{sb} 和 u_{sc} 之间的相位差的目标值; I_s 为 CSC 调制电流 i_{ca} 、 i_{cb} 和 i_{cc} 基波分量的幅值; ϕ_s 为 CSC 调制电流 i_{ca} 、 i_{cb} 和 i_{cc} 基波分量的初始相位。

式(1)表明,该触发控制策略对 CSC 输出电流中基波分量的幅值和相位具有很好的可控性。

2.2 CSMES 的功率控制

将 SMES 接入实际电力系统进行功率调节时,SMES 的控制一般由外环控制和内环控制两部分组成。外环控制器作为主控制器用于按照电力系统的需求,提供内环控制所需要的有功和无功功率给定值。内环控制器主要完成 2 项工作,首先它必须根据系统的实际功率需要,确定诸如变流器进行 PWM 控制所需调制信号的幅值和相位等控制量,从而实现了对系统有功和无功功率相应的补偿;然后它还必须根据变流器的控制方式,产生各开关器件的触发脉冲信号,使变流器交流侧电流的幅值和相位跟踪给定的目标值,从而达到按照外环控制的要求进行四象限调节有功和无功功率的目的。

在图 1 所示三相电压对称的电网中,三相电流之和与三相电压之和均为零,即 $i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0$, $u_{sa} + u_{sb} + u_{sc} = 0$ 。如果电压和电流之间的相位差为 α ,并且考虑 SMES 接入点处的电流等于 CSC 调制电流 i_{ca} 、 i_{cb} 和 i_{cc} 的基波分量,结合瞬时功率理论,利用三角恒等式和式(1)可得 CSMES 的调节有功和无功功率如下:

$$P_{sm} = \frac{3}{2} U_s I_s \cos \alpha = \frac{3\sqrt{3}}{4} U_s M I_{sm} \cos \alpha \quad (2)$$

$$Q_{sm} = \frac{3}{2} U_s I_s \sin \alpha = \frac{3\sqrt{3}}{4} U_s M I_{sm} \sin \alpha \quad (3)$$

其中, U_s 、 I_s 分别为电网中 SMES 接入点处变流器的基波电压和电流的幅值。

SMES 的功率调节目的是跟踪给定的有功和无功功率参考值,将参考值 P_r 和 Q_r 代入式(2)、(3)可得:

$$\alpha = f(P_r, Q_r) = \arctan(Q_r / P_r) \quad (4)$$

$$M = g(P_r, Q_r) = \frac{4\sqrt{P_r^2 + Q_r^2}}{3\sqrt{3}U_s I_{sm}} \quad (5)$$

式(4)、(5)表明,通过直接调节 M 和 α ,可以实现 SMES 和电网之间按照给定的功率参考值交换有功和无功功率。

图 3 是所设计的 CSMES 功率控制器原理图。图中,2 个 PI 调节器构成的有功和无功功率反馈控制环节用来补偿由变压器和变流器以及滤波器的功率损耗所引起的给定功率和 SMES 调节功率之间的误差。同时通过合适地选取 PI 调节器的参数可以避免因调节功率误差引起的 α 和 M 剧烈变化,从而减少 SMES 输出电流和调节功率的振荡,提高 SMES 的输出电流品质和功率响应特性。

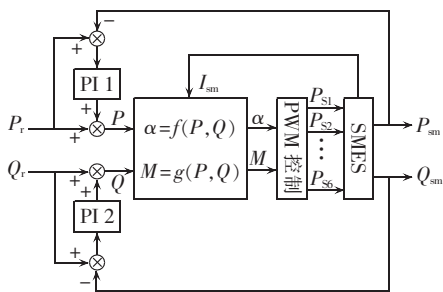


图 3 CSMES 功率控制原理图

Fig.3 Schematic diagram of CSMES power control

3 VSMES 的功率控制

3.1 VSC 交流侧电流的两相旋转坐标系解耦控制

假设三相系统平衡并忽略开关器件的损耗,根据基尔霍夫定律可以建立图 2 所示 VSC 的时域数学模型如式(6)和式(7)所示^[5]。

$$\begin{cases} u_{sa} = L \frac{di_{sa}}{dt} + i_{sa}R + S_a^* U_{dc} + u_N \\ u_{sb} = L \frac{di_{sb}}{dt} + i_{sb}R + S_b^* U_{dc} + u_N \\ u_{sc} = L \frac{di_{sc}}{dt} + i_{sc}R + S_c^* U_{dc} + u_N \end{cases} \quad (6)$$

$$C_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = S_a^* i_{sa} + S_b^* i_{sb} + S_c^* i_{sc} - I_{dc} \quad (7)$$

其中, u_{sa} 、 u_{sb} 、 u_{sc} 分别为电网三相电源相电压; i_{sa} 、 i_{sb} 、 i_{sc} 分别为 VSC 交流侧的三相电流; I_{dc} 为 VSC 直流侧母线电流; U_{dc} 为 VSC 直流侧母线电压; u_N 为三相电源的中性点电压; S_a^* 、 S_b^* 、 S_c^* 为三相桥臂的开关函数, S_a^* 、 S_b^* 、 $S_c^* = 1$ 代表 a、b、c 三相上桥臂各开关器件导通、三相下桥臂各开关器件关断, S_a^* 、 S_b^* 、 $S_c^* = 0$ 则代表 a、b、c 三相下桥臂各开关器件导通、上桥臂各开关

器件关断。

遵循功率不变的原则,同时考虑三相对称的条件,利用 Park 变换可进一步得到 VSC 在同步旋转 dq 坐标系下的数学模型式(8)所示。

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{dU_{dc}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega & -\frac{S_d}{L} \\ -\omega & -\frac{R}{L} & -\frac{S_q}{L} \\ \frac{S_d}{C} & \frac{S_q}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \\ i_L \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式(8)可知 VSC 交流侧电流的 d 、 q 轴分量分别为:

$$\begin{cases} L \frac{di_{sd}}{dt} = -Ri_{sd} + \omega Li_{sq} + u_{sd} - u_{rd} \\ L \frac{di_{sq}}{dt} = -Ri_{sq} - \omega Li_{sd} + u_{sq} - u_{rq} \end{cases} \quad (9)$$

其中, d 、 q 轴电流除受控制电压 u_{rd} (等于 $S_d U_{dc}$) 和 u_{rq} (等于 $S_q U_{dc}$) 的影响,还受耦合电压 ωLi_{sq} 、 $-\omega Li_{sd}$ 和电网电压 u_{sd} 、 u_{sq} 的影响。由于仅对 d 、 q 轴电流进行负反馈控制不能消除 d 轴和 q 轴之间的电流耦合,因此无法利用对直流电压 U_{dc} 的 PWM 来控制 VSC 的 d 、 q 轴电流分量。如果在控制 VSC 输出电流的调制电压中引入电流状态反馈和电网电压的前馈补偿,即 u_{rd} 和 u_{rq} 分别由以下 3 种控制分量构成, $u_{rd} = u_{rd1} + u_{rd2} + u_{rd3}$ 、 $u_{rq} = u_{rq1} + u_{rq2} + u_{rq3}$, 其中, $u_{rd1} = u_{sd}$ 、 $u_{rd2} = \omega Li_{sq}$ 、 $u_{rq1} = u_{sq}$ 、 $u_{rq2} = -\omega Li_{sd}$, 则对 VSC 的 d 、 q 轴电流分量控制呈现出式(10)所示的相互独立解耦的一阶惯性环节控制特性。

$$\begin{cases} L \frac{di_{sd}}{dt} + Ri_{sd} = -u_{rd3} \\ L \frac{di_{sq}}{dt} + Ri_{sq} = -u_{rq3} \end{cases} \quad (10)$$

3.2 VSMES 的功率控制

式(10)同时表明,在电网电压 U_s 和输入电抗一定的情况下,通过控制 VSC 交流侧 d 、 q 轴的电压 u_{rd3} 和 u_{rq3} ,能够对变流器交流侧的 d 、 q 轴电流进行准确控制。由电网和 VSMES 之间的拟交换功率确定 VSMES 交流侧 d 、 q 轴输出电流 i_{sdr} 、 i_{sqr} ,再根据式(10)计算 u_{rd3} 和 u_{rq3} 控制分量。

$$\begin{cases} i_{sdr} = \frac{u_{sd} P_{sm_ref} + u_{sq} Q_{sm_ref}}{u_{sd}^2 + u_{sq}^2} \\ i_{sqr} = \frac{u_{sq} P_{sm_ref} - u_{sd} Q_{sm_ref}}{u_{sd}^2 + u_{sq}^2} \end{cases} \quad (11)$$

其中, P_{sm_ref} 和 Q_{sm_ref} 分别为 VSMES 和电网之间拟交

换的有功和无功功率。

根据前面所述的 VSC 交流侧电流解耦控制原理可知,通过在所确定的 u_{rd3} 和 u_{rq3} 控制分量基础上叠加电流状态反馈和电网电压的前馈补偿,即可实现图 4 所示 VSMES 的功率控制。

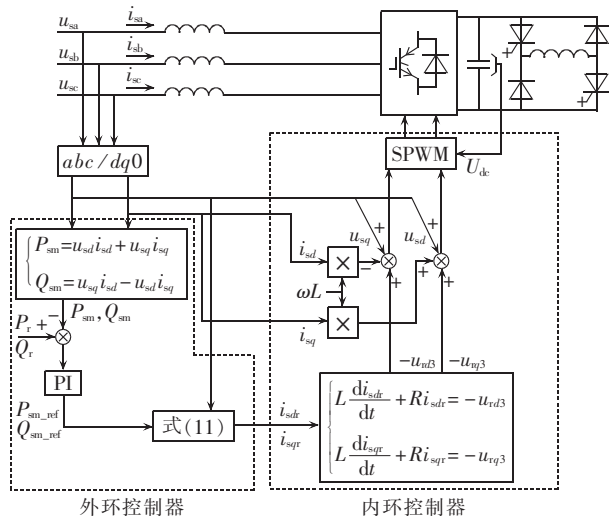


图 4 VSMES 的功率控制原理图

Fig.4 Schematic diagram of VSMES power control

图 4 中,外环控制器用于保持 VSMES 与电网交换的功率跟踪功率指令值。它主要依据 VSMES 的功率交换指令值 P_r 、 Q_r 与实际值 P_{sm} 、 Q_{sm} 之间的误差经 PI 调节后确定用于内环控制器输入的 VSC 交流侧电流的 d 、 q 轴电流控制分量 i_{sdr} 和 i_{sqr} 。

电流内环控制器则根据外环控制器的 d 、 q 轴指令电流和 VSC 交流侧等效电感和阻抗形成用于控制 VSC 交流侧电流 d 、 q 轴分量的 u_{rd3} 和 u_{rq3} ,然后该控制量分别与引入的 u_{rd1} 、 u_{rd2} 和 u_{rq1} 、 u_{rq2} 控制分量相加,形成用于 VSC 进行 SPWM 的调制波信号的 d 、 q 轴电压分量 u_{rd} 和 u_{rq} 。正弦调制信号的幅值 M 和相位 α 由式(12)确定:

$$\begin{cases} \alpha = \arctan \frac{u_{rd}}{u_{rq}} \\ M = \frac{2\sqrt{u_{rd}^2 + u_{rq}^2}}{U_{dc}} \quad M \in [0, 1] \end{cases} \quad (12)$$

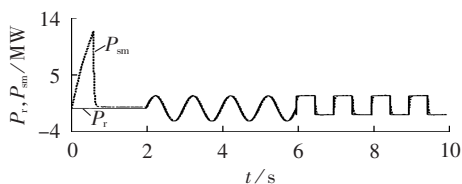
3.3 VSMES 的斩波器控制

在 VSC 按照功率参考指令进行 VSMES 输入或输出功率调节时,其斩波器则根据设定的 VSC 直流侧电压给定值 $U_{dc,ref}$ 与 U_{dc} 的偏差,通过 PI 调节器产生期望的 VSC 直流母线电压的控制信号。根据该控制信号,确定超导磁体的储能或释能工作状态,从而通过调节图 2 所示斩波器的开关器件 S_7 和 S_8 开断配合,使得 U_{dc} 快速跟踪 $U_{dc,ref}$ 。

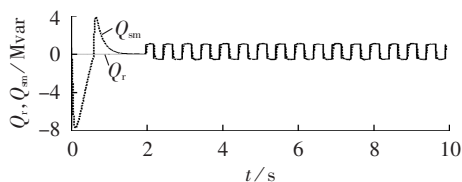
4 仿真结果

利用 PSCAD 仿真软件对图 1 所示的 CSMES 储

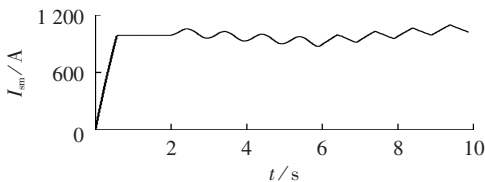
能系统进行功率控制仿真研究。主要仿真参数为: CSC 电网相电压幅值为 1 kV,交流侧等效电感为 $L=200 \mu\text{H}$,滤波电容 $C=100 \mu\text{F}$,超导磁体等效电感为 8 H。超导磁体的初始设定储能电流为 1 kA,仿真时间为 10 s,仿真过程设置如下:0~2 s,CSMES 工作在磁体电流为 1 kA 的储能状态;2~6 s,有功功率指令为 $P_r=2 \sin(2\pi t)$ (MW), Q_r 为正、负幅值分别为 1 Mvar、-0.5 Mvar 且频率为 0.5 Hz 的方波指令;6~10 s,有功功率指令 P_r 变化为正、负幅值分别为 2 MW、-1 MW 且频率为 1 Hz 的方波指令, Q_r 指令没有发生变化。CSMES 的四象限功率跟踪响应曲线如图 5 所示。



(a) CSMES 的有功功率动态响应



(b) CSMES 的无功功率动态响应



(c) 磁体电流的动态响应

图 5 CSMES 的四象限功率调节特性

Fig.5 Power regulation performance of CSMES in four quadrants

由图 5 可知,CSMES 在所研究功率调节方法的控制下,不仅能按照设定电流对磁体进行储能,而且能在四象限范围内快速跟踪外部有功功率和无功功率指令,具有响应速度快、调节特性好的特点。

图 2 所示系统的主要参数为:VSC 电网相电压幅值为 1 kV,交流侧等效电阻 $R=0.2 \Omega$,交流侧电感 $L=5 \text{ mH}$,直流电容 $C_d=10 \text{ mF}$,线圈等效电感为 8 H。仿真时间为 15 s。

仿真过程设置如下:0~7 s,VSMES 工作在 $U_{dc}=2 \text{ kV}$ 、磁体电流为 0.8 kA 的储能状态;7~15 s,有功功率指令 P_r 为正、负幅值分别为 0.2 MW、-0.2 MW 且频率为 0.5 Hz 的三角波指令, $Q_r=0.2 \sin(\pi t)$ (Mvar),VSMES 的四象限功率跟踪响应曲线如图 6 所示。

由图 6(d)可知,VSMES 通过 VSC 和斩波器的协调功率控制,使 VSC 直流侧电压稳定在 2 kV。在

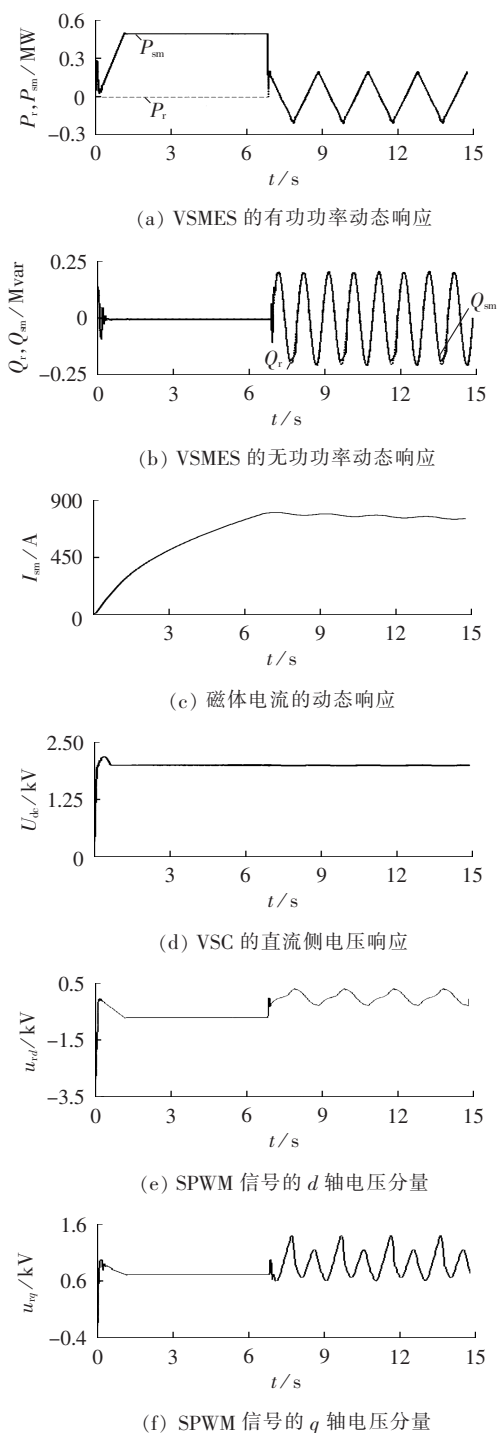


图 6 VSMES 的四象限功率调节特性

Fig.6 Power regulation performance of VSMES in four quadrants

此基础上,对超导磁体进行储能,储能电流设定为 0.8 kA。7 s 时,当磁体储能电流达到设定值时,VSMES 在所设计功率调节方法的控制下,立刻对 P_r 和 Q_r 指令进行快速准确的功率跟踪。图 6(e)和图 6(f)则描述了功率调节过程中式(12)所示 u_{rd} 和 u_{rq} 分量的动态变化过程,可知,0~7 s 由于 VSEMS 以恒定功率储能,因此 u_{rd} 和 u_{rq} 分量保持恒定,随着 VSEMS 在 7~15 s 按照指令功率进行功率调节,SPWM 信号的 d

轴和 q 轴电压分量分别跟踪有功和无功功率指令变化。

此外,对比图 5(c)的磁体电流变化周期与图 5(a)、图 5(b)的功率指令变化周期,以及图 6(c)与图 6(a)、图 6(b)可知,对 SMES 的有功调节会引起磁体电流 I_{sm} 发生变化,而无功调节则不会引起磁体电流的变化,即不改变磁体储能。

5 结论

SMES 储能密度大,充放电速度快且没有环境污染,是非常理想的储能元件。快速准确的四象限功率调节是实现 SMES 在电力系统应用的关键。本文从实现对 SMES 电网侧电流幅值和相位的能控性出发,探讨了 CSC 和 VSC 的 SPWM 开关策略,在此基础上进一步研究并提出了用于实现 CSMES 和 VSMES 的功率控制策略。仿真实验研究证明了所建立的四象限功率跟踪控制方法的正确性和控制的灵活性,同时表明该控制方法可为实现 SMES 在电力系统中的应用奠定基础。

参考文献:

- [1] 余江,曾建平. SMES 及其在电力系统中的应用[J]. 电力自动化设备,2000,20(3):32-34,50.
YU Jiang,ZENG Jianping. Relative problems of using SMES in electric power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2000,20(3):32-34,50.
- [2] 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.
- [3] 韩翀,李艳,余江,等. 超导电力磁储能系统研究进展——超导磁储能装置[J]. 电力系统自动化,2001,25(12):63-68.
HAN Chong,LI Yan,YU Jiang,et al. Application development of SMES in electric power system[J]. Automation of Electric Power Systems,2001,25(12):63-68.
- [4] 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 Liye. Present station and development trend of superconducting power technology[J]. Power System Technology, 2004,28(9):33-37.
- [5] 程时杰,李刚,孙海顺,等. 储能技术在电气工程领域中的应用与展望[J]. 电网与清洁能源,2009,25(2):1-8.
CHENG Shijie,LI Gang,SUN Haishun,et al. Application and prospect of energy storage in electrical engineering[J]. Power System and Clean Energy,2009,25(2):1-8.
- [6] 陈星莺,刘孟觉,单渊达. 超导储能单元在并网型风力发电系统的应用[J]. 中国电机工程学报,2001,21(12):63-66.
CHEN Xingying,LIU Mengjue,SHAN Yuanda. Application of superconducting magnetic energy storage system-SMES in wind power system of network forming[J]. Proceedings of the CSEE, 2001,21(12):63-66.

- [7] 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 Shuangxi,WU Wei,WU Junling,et al. Application of superconducting magnetic energy storage to improve transient voltage stability[J]. Power System Technology,2004,28(4):1-5.
- [8] IGLESIAS I J,ACERO J. Comparative study and simulation of optimal converter topologies for SMES systems[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity,1998,5(2):254-257.
- [9] 彭晓涛,程时杰,王少荣,等. 一种新型的电流源型变流器 PWM 控制策略及其在超导磁储能装置中的应用[J]. 中国电机工程学报,2007,27(22):60-66.
PENG Xiaotao,CHENG Shijie,WANG Shaorong,et al. A novel PWM control for current source converter and its application in a superconducting magnet energy storage unit[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(22):60-66.
- [10] ZHANG Zhongchao,OOI B T. Multi-modular current-source SPWM converter for a superconducting magnetic energy storage system[J]. IEEE Trans on Power Electronics,1993,3(8):250-256.
- [11] 刘逊,朱晓光,褚旭. 超导储能装置中的电流源型逆变器[J]. 电力电子技术,2004,38(4):20-22.
LIU Xun,ZHU Xiaoguang,CHU Xu. Current Source Inverter (CSI) in SMES[J]. Power Electronics,2004,38(4):20-22.
- [12] 诸嘉慧,程强,杨斌. 电压型高温超导储能系统变流器设计与试验[J]. 电力自动化设备,2011,31(2):119-123.
ZHU Jiahui,CHENG Qiang,YANG Bin. Design and experiment of voltage source converter for high temperature superconducting magnetic energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(2):119-123.
- [13] 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 Xianzhong. Rotating space vector control algorithm of Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) [J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(21):39-44.
- [14] 郑颖楠,傅诚. 电压型可逆变流器的控制策略现状与发展[J]. 电气传动,2001(6):3-6.
ZHENG Yingnan,FU Cheng. The present situation and development of control strategy in three-phase rectifier converters[J]. Electric Drive,2001(6):3-6.
- [15] 郭文勇,赵彩宏,张志丰,等. 电压型超导储能系统的统一直接功率控制方法[J]. 电网技术,2007,31(9):60-63.
GUO Wenyong,ZHAO Caihong,ZHANG Zhifeng,et al. A unified direct power control method for voltage type superconducting magnetic energy storage system[J]. Power System Technology,2007,31(9):60-63.
- [16] 彭晓涛. 电力系统稳定控制用 SMES 装置及其性能研究[D]. 武汉:华中科技大学,2006.
PENG Xiaotao. Development and performance investigation of a SMES system used for power system stability enhancement[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2006.

作者简介:

袁 田(1991-),女,湖北潜江人,硕士研究生,研究方向为储能及其在电力系统中的应用(**E-mail**:yuantian@whu.edu.cn);

彭晓涛(1971-),男,湖北武汉人,副教授,通讯作者,从事电力系统规划、储能技术及其在电力系统应用的研究工作(**E-mail**:hustpxt@163.com);

王 丹(1989-),女,湖南娄底人,硕士研究生,研究方向为电力系统分析与规划(**E-mail**:nancy_fighting@126.com);

王达达(1975-),男,云南昆明人,高级工程师,从事超导技术在电力系统应用的研究工作;

宋 萌(1980-),男,湖北武汉人,博士,从事超导技术在电力系统应用的研究工作。

Power control of superconducting magnetic energy storage system

YUAN Tian¹,PENG Xiaotao¹,WANG Dan¹,WANG Dada²,SONG Meng²

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

2. Electric Power Research Institute of Yunnan,Kunming 650000,China)

Abstract: A strategy of SPWM switching is discussed,which can be applied to effectively control the amplitude and phase of current at AC side of current source converter or voltage source converter,and a method of power control is studied,which can be applied to regulate the active power and reactive power according to the requirements of system for two kinds of superconducting magnetic energy storage system. Simulative results show that,with the studied method of power regulation,the rapid decoupled control of the input/output active power and reactive power of superconducting magnetic energy storage system can be realized in four quadrants,verifying the correctness and feasibility of the proposed strategy.

Key words: superconducting magnetic energy storage system; energy storage; power control; electric converters