

文章编号:1674-2869(2011)08-0103-04

基于微分几何的电池储能系统输出稳定控制器设计

王忠勇

(福建武夷学院 电气工程系, 福建 武夷山 354300)

摘 要:为消除由于外界干扰引起的系统不稳定,通过对电池储能系统的数学模型进行分析,基于微分几何理论,采用非线性控制方法对系统输出控制器的设计,达到对系统输出量进行稳定控制的目的. 为了消除控制偏差,对设计的控制器增加了抗干扰环节. 仿真结果表明设计的非线性控制策略具有很好的动态性能,证明了控制方法的适用性.

关键词:微分几何; 电池储能系统; 输出稳定

中图分类号:TM712 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2011.08.025

0 引 言

电池储能系统的出现对提高电力系统的电能质量,解决电力系统储存电能的问题,提供了有效的方法. 当储能系统连接在电网用户负荷附近,能迅速吸收负荷的变化,很好的解决电力系统的控制问题^[1-2]. 不同的非线性控制方式可有效提高系统的鲁棒性,减少控制器设计带来不稳定的现象^[3-4]. 根据在系统中接入位置的不同,电池储能系统在电力系统的方式主要有两种^[5]:电池储能系统接在发电侧;电池储能系统接在负荷侧. 由于电力系统的非线性且是耦合的,使得储能系统的控制不能采用传统的控制方法来实现有效的输出控制.

近年来得到广泛应用和发展的非线性理论^[6-8],采用更加符合非线性问题本质的方法,非线性控制策略可以使被控问题得到满意的稳态和动态性能,从而使得原本采用经典控制理论难以处理的问题得到了长足的发展,在电力、力学、控制等多个领域得到广泛的应用^[9-11]. 将非线性理论应用于电池储能系统,也有不少学者从不同的角度做了一定的探讨,文献^[12]对 NaS 电池系统的模型通过反馈线性化理论,设计了非线性内环控制器,结合外环 PI 控制器,抑制了由参数不准确带来的系统稳态误差. 文献^[13]在将储能系统应用于波浪能发电系统并设计了解耦控制器,实现对输出电压和功率的控制.

采用基于微分几何的非线性方法对电池储能系统的第二个问题做深度分析,设计了能够削弱

外界干扰的输出稳定控制器,通过对输出偏差进行校正,达到系统稳定的目的. 仿真结果表明设计的非线性控制器可以很好的消除干扰的影响,提高系统电压的稳定性.

1 电池储能系统外接模型

当用户对电能质量和电压波形要求较高时,需要把电池储能系统接在负荷侧^[14]. 由于它可以迅速调节接入点的功率,当电池储能系统接在这个位置,如果系统受到扰动改变平衡状态,能够快速稳定系统电压,保证电压波形的光滑输出,有效地提高用户电能质量.

图 1 为接有电池储能系统的电路示意图.

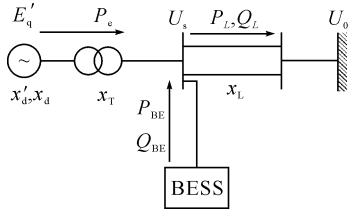


图 1 电池储能系统接在负荷侧的电路图

Fig. 1 Circuit of BESS connected to the load side

1.1 感应电机模型

对图 1 中的电动机采用下面的三阶模型:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = (\omega - 1) \cdot \omega_0 \\ \dot{\omega} = \frac{1}{T_j} (T_e - T_m) \\ \dot{E}'_d = -\frac{1}{T_0} [E'_d + (x - x') I_q] - \omega_0 (\omega - 1) E'_q \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中 ω 是转子角速度, δ 电动机功角, E_q' 是电机暂态电动势, D 是阻尼系数, U_{sq} 是母线 q 轴电压, P_m 是机械功率, P_e 是电动机功率, T_J 是惯性时间常数.

1.2 系统模型

按照系统的构成,带负载的电路如图 2 所示.

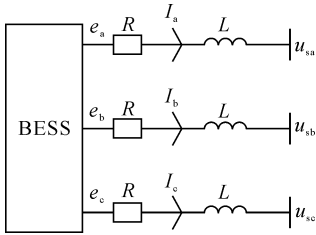


图 2 带负载电路图

Fig. 2 Circuit connected to the load

电路的微分方程为

$$\begin{cases} L \frac{dI_a(t)}{dt} = e_a - u_{sa} - RI_a \\ L \frac{dI_b(t)}{dt} = e_b - u_{sb} - RI_b \\ L \frac{dI_c(t)}{dt} = e_c - u_{sc} - RI_c \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中 u_{sa}, u_{sb}, u_{sc} 分别是相电压, I_a, I_b, I_c 分别是相电流, R 是电路等效电阻, L 是等效电感.

对式(2)变化为 d-q 格式,可以得到

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega_* \\ -\omega_* & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} E_d - U_{sd} \\ e_q - U_{sq} \end{bmatrix} \quad (3)$$

由式(1)和式(3),可以得到带有系统模型:

$$\begin{cases} \dot{E}_d' = -\frac{1}{T_0} [E_d' + (x-x') I_{Imq}] - \omega_0 (\omega-1) E_q' \\ \dot{E}_q' = -\frac{1}{T_0} [E_q' - (x-x') I_{Imd}] + \omega_0 (\omega-1) E_d' \\ \dot{\omega} = (T_e - T_m) / T_J \\ \dot{I}_d = -\frac{R}{L} \cdot I_{BEd} + \omega_* \cdot I_{BEq} + \frac{1}{L} \cdot (2EM \cos \alpha - U_{sd}) \\ \dot{I}_q = -\omega_* \cdot I_{BEd} - \frac{R}{L} \cdot I_{BEq} + \frac{1}{L} \cdot (2EM \sin \alpha - U_{sq}) \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中的 e_d, e_q 分别用峰值电压 E , 调制比 M 和导通角 α 描述, 即 $e_d = 2EM \cos \alpha, E_q = 2EM \sin \alpha$.

1.3 系统模型的变换

对电池储能负载电路模型, 令 $\mathbf{u} = (u_1 u_2 u_3)^T = (V_f u_M u_a)^T$ 为输入量, $\mathbf{x} = (x_1 x_2 x_3 x_4 x_5)^T = (E_d' E_q' \omega i_d i_q)^T$ 为状态量.

则式(4)可变换为仿射非线性系统 $\dot{x} = f(x) + g(X)u$ 的形式.

其中

$$f(x) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_0} [E_d' + (x-x') I_{Imq}] - \omega_0 (\omega-1) E_q' \\ -\frac{1}{T_0} [E_q' - (x-x') I_{Imd}] + \omega_0 (\omega-1) E_d' \\ \frac{1}{T_J} (T_e - T_m) \\ -\frac{R}{L} \cdot I_d + \omega_* \cdot I_q - \frac{U_{sd}}{L} \\ -\omega_* \cdot I_d - \frac{R}{L} \cdot I_q - \frac{U_{sq}}{L} \end{bmatrix},$$
$$g(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{d0}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2E}{L} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2E}{L} \end{bmatrix} \quad (5)$$

1.4 系统输出量的选择

根据对电池储能系统的作用进行分析, 考虑对感应电机和系统输出控制的要求, 电池储能系统 d 轴电流 i_d 和 q 轴电流 i_q , 转速偏差 $\Delta\omega$, 负载功率 P_d 以及母线电压 U_s 五个变量需要重点考虑, 因此选择以上五个量作为本系统的控制目标, 即

$$\mathbf{y} = \{h_1 h_2 h_3 h_4 h_5\}^T = \{i_d i_q \Delta\omega P_d U_s\}^T \quad (6)$$

式(6)中 $\Delta\omega = \omega - \omega_0, P_d = U_{sd} \cdot I_{Imd} + U_{sq} \cdot I_{Imq}, U_s = \sqrt{U_{sd}^2 + U_{sq}^2}$.

根据式(6)的输出变量, 分别计算系统对应的关系度^[7].

计算后系统的关系度为 $r = 1 + 1 + 1 + 1 + 1 = n$.

2 非线性系统最优化控制

2.1 系统的跟踪偏差^[15]

仿射非线性系统模型如下:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(x) + \sum_{i=1}^n \mathbf{g}_i(x) u_i \\ y_i = h_i(x) \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中 \mathbf{x} 为 n 维状态列向量, $\mathbf{f}(x), \mathbf{g}_i(x)$ 为状态空间中 n 维向量场, u_i 为控制标量, $y_i = h_i(x)$ 为输出标量.

设 $\mathbf{y}_r = [y_{1r}, \dots, y_{mr}]^T$ 是非线性系统输出量的跟踪目标, 则可以得到误差量: $\gamma_i = y_{refi} - y_i (i = 1, \dots, m)$, 其中 γ_i 为输出变量的跟踪偏差.

2.2 非线性控制规律设计

非线性系统的精确线性化定理^[7]指出: 若非

线性系统矩阵 $\mathbf{g}(x)$ 的秩为 m , 如果存在 m 维函数 $\mathbf{h}(X) = [h_1, \dots, h_m]^T$, 使得系统有相对阶向量 $[r_1, \dots, r_m]$, 且系统总关系度 $r = r_1 + \dots + r_m = n$, 即系统的总关系度 r 等于维数 n , 那么该系统就能实现精确线性化控制。

对非线性系统(7)的输出 y 进行连续微分得:

$$y_i = L_f h_i + \sum_{j=1}^m (L_{g_j} h_i) u_j \quad (8)$$

此时, 如果对于所有 j , $L_{g_j} h_i(X) = 0$, 即控制变量没有出现, 则继续微分得:

$$y_i^{r_i} = L_f^{r_i} h_i + \sum_{j=1}^m (L_{g_j} L_f^{r_i-1} h_i) u_j \quad (9)$$

直到其中至少有一个 $L_{g_j} L_f^{r_i-1} h_i(X) \neq 0$. 对非线性系统的每一个输出变量 y_i 进行上述微分过程, 然后将它们组合在一起, 就可得到

$$\begin{bmatrix} y_1^{(r_1)} \\ \vdots \\ y_m^{(r_m)} \end{bmatrix} = \boldsymbol{\varphi}(X) + \mathbf{B}(X) \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\text{其中 } \boldsymbol{\varphi}(X) = \begin{bmatrix} L_f^{r_1} h_1(X) \\ \vdots \\ L_f^{r_m} h_m(X) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}(X) = \begin{bmatrix} L_{g_1} L_f^{r_1-1} h_1(X) & \cdots & L_{g_r} L_f^{r_1-1} h_1(X) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ L_{g_1} L_f^{r_m-1} h_m(X) & \cdots & L_{g_r} L_f^{r_m-1} h_m(X) \end{bmatrix}$$

由分析可以看出, 非线性控制律由两部分组成, 即状态量反馈部分 $-\mathbf{B}^{-1}(X)\boldsymbol{\varphi}(X)$ 和变换后的线性子系统状态量反馈部分 $\mathbf{B}^{-1}(X)V$. 由前面的分析可得到系统输出和新输入之间的关系:

$$[y_1^{r_1} \quad \cdots \quad y_m^{r_m}]^T = [v_1 \quad \cdots \quad v_n]^T \quad (11)$$

通过变换即实现输入输出之间的精确线性化。

对于多输入多输出非线性系统, 如果计算得解耦矩阵为 $|\mathbf{E}(X)| \neq 0$, 则 $\mathbf{B}(X)$ 在状态变量工作范围内非奇异。

2.3 非线性控制器设计

已知 $u = -\mathbf{B}^{-1}(X)\boldsymbol{\varphi}(X) + \mathbf{B}^{-1}(X)V$, 即

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{bmatrix} = \mathbf{E}^{-1}(X) \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_f h_1(X) \\ L_f h_2(X) \\ L_f h_3(X) \\ L_f h_4(X) \\ L_f h_5(X) \end{bmatrix}$$

$$\text{又} \quad \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1^{(1)} \\ y_2^{(1)} \\ y_3^{(1)} \\ y_4^{(1)} \\ y_5^{(1)} \end{bmatrix} \quad (12)$$

设定输出量的偏差 $\gamma = y - y_{\text{ref}}$, 为实现对系统的跟踪偏差的控制, 新的输入量确定为

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{y}_{1\text{ref}} - k_{11}\dot{\gamma}_1 - k_{12}\gamma_1 - k_{13}\int\gamma_1 d \\ \dot{y}_{2\text{ref}} - k_{21}\dot{\gamma}_2 - k_{22}\gamma_2 - k_{23}\int\gamma_2 d \\ \dot{y}_{3\text{ref}} - k_{31}\dot{\gamma}_3 - k_{32}\gamma_3 - k_{33}\int\gamma_3 dt \\ \dot{y}_{4\text{ref}} - k_{41}\dot{\gamma}_4 - k_{42}\gamma_4 - k_{43}\int\gamma_4 dt \\ \dot{y}_{5\text{ref}} - k_{51}\dot{\gamma}_5 - k_{52}\gamma_5 - k_{53}\int\gamma_5 dt \end{bmatrix} \quad (13)$$

尽管已经将电机的非线性系统做了线性化处理, 但当控制系统有参数发生扰动时依然存在跟踪偏差, 为了消除这个偏差, 在上式的基础上增加抗干扰环节, 则系统的输出跟踪误差方程:

$$\begin{cases} \ddot{\gamma}_1 + k_{11}\ddot{\gamma}_1 + k_{12}\dot{\gamma}_1 - k_{13}\gamma_1 = 0 \\ \ddot{\gamma}_2 + k_{21}\ddot{\gamma}_2 + k_{22}\dot{\gamma}_2 - k_{23}\gamma_2 = 0 \\ \ddot{\gamma}_3 + k_{31}\ddot{\gamma}_3 + k_{32}\dot{\gamma}_3 - k_{33}\gamma_3 = 0 \\ \ddot{\gamma}_4 + k_{41}\ddot{\gamma}_4 + k_{42}\dot{\gamma}_4 - k_{43}\gamma_4 = 0 \\ \ddot{\gamma}_5 + k_{51}\ddot{\gamma}_5 + k_{52}\dot{\gamma}_5 - k_{53}\gamma_5 = 0 \end{cases} \quad (14)$$

从式(14)中可知通过对系统进行合理的极点配置就能计算出增益参数值 k , 确保系统的跟踪误差快速收敛至零. 通过对上式控制量 k 的表达式做逆变换, 即可得到控制量 u , 从而实现电池储能系统的非线性控制。

3 仿真结果及分析

为了验证控制器设计的有效性, 采用 MATLAB/Simulink 仿真, 仿真参数如下:

$$\begin{aligned} x &= 3.384, x' = 0.411, X_s = 1.037, R_s = 1.314, x_e = 0.1396, T_0' = 0.576 \text{ s}, T_j = 2 \text{ s}, \\ R &= 0.2, L = 0.05, E = 1, \omega_0 = 100 \pi \text{ r/s}, \omega_* = 1, \\ U_0 &= 1, U_s = 0.9, s = 0.0116, P_{d0} = P_{s0} = 0.3799. \end{aligned}$$

对仿真系统分别设计为电压突然降落 6% 和三相回路有一相突然短路时电压的恢复情况和 PID 控制最对比, 对比情况分别如图 3 和图 4 所示。

仿真结果分析: (1) 从图 3 看出, 非线性控制的系统电压可以很快的恢复到接近原先的水平. (2) 从图 4 看出, 在 0.13 s 后非线性控制的电压恢复到原先的水平, PID 控制用了 0.70 s.

与传统的 PID 控制器相比较, 以上叙述的控制器能有效地提高系统的稳定性并能得到更好的动态响应特性。

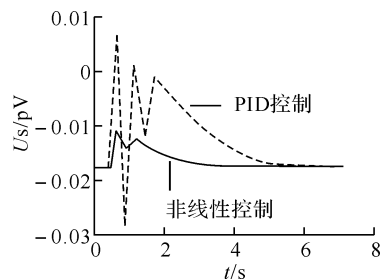


图 3 电压突然降落 6%时电压的恢复对比
Fig. 3 Recovery comparison to disturbance of voltage stepping down 10%

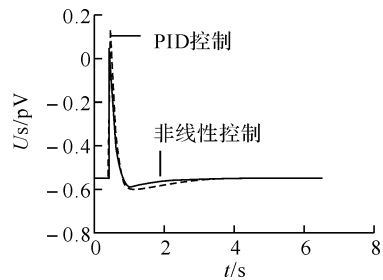


图 4 一相突然短路时电压恢复对比
Fig. 4 Recovery comparison to disturbance of one phase sudden short - circuit

4 结 语

依据基于微分几何的非线性理论,建立了用于消除输出跟踪偏差的输出控制器,应用于电池储能系统,具有良好的控制效果,能抑制由于干扰产生的系统输出偏差。仿真试验证明设计的最优控制器获得了良好的动态品质,在系统受到扰动时,在控制器作用下系统的鲁棒性较强,表明具有很好的适应性。

参考文献:

[1] 梁才浩,段献忠. 分布式发电及对电力系统的影响[J]. 电力系统自动化,2001,25(12):53 - 55.

[2] 姜齐荣,谢小荣. 电力系统并联补偿结构原理与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
[3] 罗承廉,纪勇,刘遵义. 静止同步补偿器的原理与实现[J]. 北京:中国电力出版社,2005.
[4] 栗时平,刘桂英. 静止无功功率补偿技术[J]. 北京:中国电力出版社,2006.
[5] 鞠萍,马大强. 电力系统负荷建模[M]. 北京:水利电力出版社,1995.
[6] Li Xiao Ccong, Cheng Shi Jie, Wei Hua, et al. Important affection of the output function in MIMO nonlinear control system design[J]. Proceedings of the CSEE, 2006,26(9):87 - 93
[7] 卢强,孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京:科学出版社,1993:183 - 195.
[8] 胡跃明. 非线性控制系统理论与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2002:110 - 121.
[9] 桂小阳,梅生伟,刘锋,等. 水轮机调速系统的非线性自适应控制[J]. 中国电机工程学报,2006,26(8):66 - 69.
[10] 熊辉霞,张磊. 体外预应力混凝土梁非线性有限元数值建模分析[J]. 武汉工程大学学报,2008,30(1):30 - 33.
[11] 赵玲,孙育红,高原. 导弹交流电动舵机的非线性解耦控制与仿真[J]. 计算机仿真,2010,27(1):98 - 100.
[12] 金一丁,宋强,刘文华. 电池储能系统的非线性控制器[J]. 电力系统自动化,2009,33(7):75 - 78.
[13] WU Feng, ZHANG Xiaoping, JUPing. Application of Battery Energy Storage in the Direct - drive Wave Energy Conversion Farm Integrated into Power Grid. Automation of Electric Power System[J]. 2010,34(14):31 - 34.
[14] 费万民,张艳莉,吕征宇. 大容量静止无功发生器与电池储能的集成[J]. 电力系统自动化,2005,29(10):41 - 44.
[15] 胡跃明. 非线性控制系统理论与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2002:110 - 121.

Design of output stability control for BESS based on differential geometry

WANG Zhong - yong

(Department of Electrical Engineering, Wuyi University, Wuyishan 354300, China)

Abstract: To reduce the instability of system caused by interference, a proper control strategy is proposed based on the differential geometry by analyzing the established nonlinear model of battery energy storage system (BESS). This nonlinear control design method is effective for improving the output stability dynamic state. In order to eliminate the influence of deviation, anti - interference links are added to the proposed nonlinear controller. Simulation results verify the stability and the anticipant dynamic response of the control strategy.

Key words: differential geometry; BESS; output stability