

DOI: 10.7667/PSPC170669

一种具有储能功能的新型电气制动装置研究

李啸聪¹, 龚彪², 冀晓诚², 袁睿智², 赵能能², 徐俊华²

(1. 广西电力系统最优化与节能技术重点实验室, 广西 南宁 530004;

2. 广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 基于超级电容储能原理, 具有储能功能的水轮机组电气制动装置, 即超级电容储能制动装置(Super Capacitor energy storage Brake Device, SCBD), SCBD 可以在发电机故障情况下甩负荷时用于调节发电机转子动能, 以提高机组暂态运行的稳定性, 还可在发电机正常停机过程中用于制动发电机转子, 辅助水轮机组快速停机。为了验证 SCBD 在水轮机组暂态运行中所起的作用, 采用微分代数多指标非线性控制(Differential Algebraic Multi-index Nonlinear Control, DAMNC)方法对水轮机励磁系统与 SCBD 进行非线性协调控制设计。仿真结果表明: SCBD 具有良好的电气制动效果, 明显提高了系统暂态稳定性, 动态、静态性能均能得到很好协调。

关键词: 超级电容储能制动装置; 水轮机; 电气制动; 微分代数系统; 多指标非线性控制

Research on a new type of electric braking device with supercapacitor energy storage functions

LI Xiacong¹, GONG Biao², JI Xiaocheng², YUAN Ruizhi², ZHAO Nengneng², XU Junhua²

(1. Guangxi Key Laboratory of Power System Optimization and Energy Technology, Nanning 530004, China;

2. College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Based on the principle of super capacitor energy storage, this paper presents a new type of electric braking device for hydraulic turbine with energy storage function, i.e. the Super Capacitor Energy Storage Brake Device (SCBD). SCBD can be used to adjust the dynamic energy of the generator rotor when the generator is under load in case of generator fault, so as to improve the stability of the hydraulic turbine transient operation, and can also be used for braking the generator rotor during the normal shutdown of the generator and assisting turbine shutdown quickly. In order to verify the SCBD function in turbine transient operation, this paper uses Differential Algebraic Multi-index Nonlinear Control (DAMNC) method to design the nonlinear coordinated control system for turbine excitation system and SCBD device. The simulation results show that the SCBD has a good electric braking effect, obviously improves the transient stability of the system, and well coordinates both the dynamic and static performance.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277056) and Natural Science Foundation of Guangxi Province (No. 2014GXNSFAA118338).

Key words: super capacitor energy storage brake device; hydraulic turbine; electric brake; differential algebraic system; multi index nonlinear control

0 引言

现代电力系统的飞速发展日益增长的电能需要提供了保障, 各种新能源(如: 风能、太阳能等)发电被接入电力系统中。由于新能源具有间歇、分散、波动等不稳定性, 给电力工作者带来了许多难

题和挑战。因此, 提高电力系统稳定性和改善电能质量就显得尤为重要^[1-2]。超级电容器作为一种新型储能元件, 具有法拉级别的电容量, 功率密度高, 能快速冲、放电, 循环寿命长, 维修保养简单等优点, 受到了许多学者关注。而电力系统中电压等级越来越高, 输送功率越来越大^[3-4]。如果超级电容器直接引入电力系统中, 当系统发生三相短路大故障时, 可能存在由于容量限制因素不能对产生的过量电磁功率进行快速吸收, 不仅可能损坏电容器组,

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51277056); 广西自然科学基金项目资助(2014GXNSFAA118338)

还会使系统的暂态稳定性提升不明显，而暂态稳定又是稳定控制的重中之重^[5-8]。

鉴于此，本文提出了一种改进的超级电容储能制动装置(Super Capacitor energy storage Brake Device, SCBD)，SCBD 主要包括消能电阻 R2、超级电容器组、双向 DC/DC 变流器、双向 DC/AC 变流器、消能电阻 R1；消能电阻 R2 与超级电容器组并联，超级电容器组与双向 DC/DC 变流器的低压侧连接，双向 DC/DC 变流器的高压侧与双向 DC/AC 变流器连接，双向 DC/AC 变流器与制动模块连接，消能电阻 R1 与变压器连接，其结构如图 1 所示。

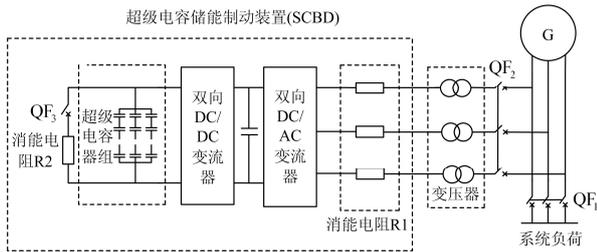


图 1 超级电容器储能制动装置的结构图

Fig. 1 Structure diagram of SCBD

当系统发生短路故障时，SCBD 能够对发电机产生的过剩电磁功率进行快速制动，SCBD 在制动过程中还能把一部分功率储存在电容器组中，保证了系统暂态稳定性的提升，当系统发生振荡或电压波动时，还能提供一定的功率支撑，较好地协调系统的动态、静态性能，改善了电能质量等，使其更好地适应于电力系统中。同时还可以作为水轮机快速停机辅助装置。本文接下来将分析 SCBD 在停机、运行过程中的应用原理，并重点讨论 SCBD 在发电机系统稳定性改善中协调控制的效果。

1 SCBD 在停机过程中的电气制动原理

SCBD 在水轮机组正常停机过程中，可以作为快速停机装置，其工作原理如图 2 所示。水轮机停机过程中， QF_2 闭合，SCBD 此时相当于一个并在机端的负荷，此时相当于与定子侧形成一个闭合回路， QF_4 闭合， QF_5 断开，厂用交流母线给励磁系统提供电源，根据电磁感应原理此时就会产生一个与水轮机机组的转子运动方向相反的强电磁力矩，从而辅助了水轮机组快速停机。水轮机正常运行过程中， QF_4 断开， QF_5 闭合，水轮机端给励磁系统提供电源；SCBD 存储的能量还能供给厂用直流母线。其中， QF_1 为水轮机断路器， QF_2 为 SCBD 投入开关， QF_4 为它励开关， QF_5 为自励开关。

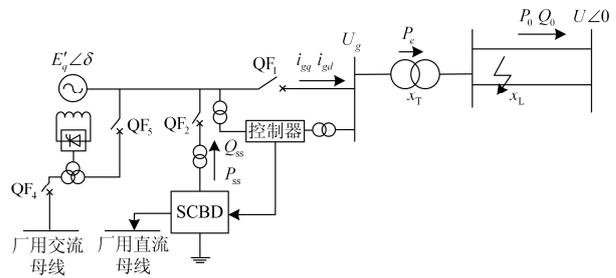


图 2 SCBD 与励磁系统的电气制动结构图

Fig. 2 Electrical braking structure diagram of SCBD with excitation system

2 SCBD 在暂态运行中的电气制动分析

下面将对 SCBD 在暂态过程所起电气制动效果进行分析，由于 DAMNC 方法对非线性系统模型有着良好的控制效果，很多文章已经论证^[9-13]。下文利用 DAMNC 方法来进行协调控制器的设计，并通过 Matlab 仿真来论证 SCBD 装置在提高系统暂态稳定性时所起的电气制动效果。

2.1 SCBD 在短路故障中的电气制动原理

当系统发生三相短路故障时，SCBD 的电气制动机理如图 3 所示。系统在 δ_1 发生三相短路时，SCBD 快速并入系统，吸收短路时产生的有功功率，减小发电机功角加速面积，在 δ_2 短路切除后继续吸收多余的有功功率，相当于增大发电机功角减速面积，直到 δ_3 重合成功。从而减小发电机功角的变化来维持系统的稳定，提高了水电站的暂态稳定性，并抑制了阻尼振荡。

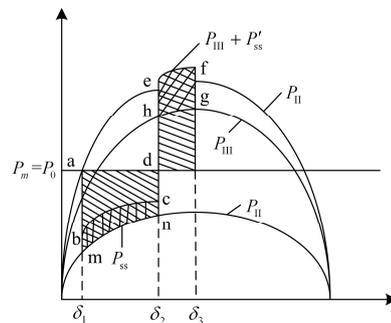


图 3 故障切除过程中 SCBD 对系统功角影响

Fig. 3 Influence of SCBD on system power angle after the removal of fault

图 3 中， δ_1 表示发电机发生故障的功角， δ_2 表示故障切除时功角， δ_3 表示重合闸成功时的功角， P_{ss} 表示 SCBD 制动的短路功率，图中由 bcmn 区域表示， P'_{ss} 表示切除故障后制动的短路功率，图中由

efgh 区域表示 P_I 、 P_{II} 、 P_{III} 为发电机的功率曲线。

为了验证 SCBD 在水轮机组暂态运行中的所起的作用, 下文将以水轮机励磁系统为切入点, 研究 SCBD 与水轮机励磁系统间的协调控制, 针对水轮机励磁系统与 SCBD 的非线性微分代数模型, 采用 DAMNC 的方法进行 SCBD 协调控制器的设计, 并借助 Hartman-Grobman 定理, 采用近似线性化后闭环系统的极点位置来配置合适的参数矩阵 使被控系统的动、静态性能得到很好的协调, 趋于渐进稳定状态。

2.2 水轮机励磁系统与 SCBD 的微分代数模型

一般水电站都地处偏远地区, 工程中常把水轮机与电力系统可以等效为单机无穷大系统^[13]。

图 4 为机端并联 SCBD 的结构示意图, E'_q 为暂态电势, P_e 为输送到负荷的功率, P_{ss} 、 Q_{ss} 为 SCBD 注入系统的有功、无功功率, i_d 、 i_q 为 SCBD 注入系统的直、交轴电流,

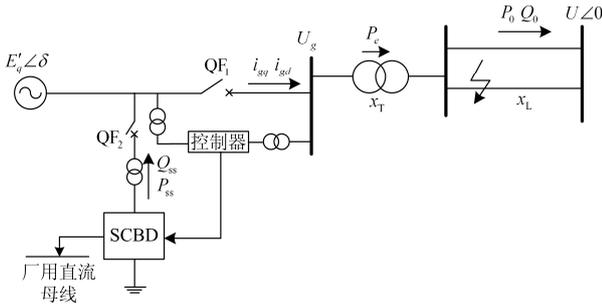


图 4 单机 SCBD 系统结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of single-machine system with SCBD

本文根据 SCBD 的原理图, 建立了 SCBD 的输入输出数学模型, 遵循电路的基本原理, 并通过 dq 坐标变换推导出 SCBD 二阶数学模型。

最后可得 SCBD 的数学表达式描述为

$$\begin{cases} \dot{i}_d = -\frac{(R_1 + R_3)}{L}i_d + \omega i_q - \frac{1}{L}(U_{dc}K \cos a - \sqrt{2}U_s) \\ \dot{i}_q = -\frac{(R_1 + R_3)}{L}i_q - \omega i_d - \frac{U_{dc}K \sin a}{L} \\ \dot{U}_{dc} = \frac{3K}{2C} \cos a i_d + \frac{3K}{2C} \sin a i_q \end{cases} \quad (1)$$

式中: R_1 为消能电阻; R_3 为各种损耗。下文公式推导中将 R_1 和 R_3 合并为 R , 令 $R = R_1 + R_3$ 。

由于 DC/DC 变流器的存在, 高压侧直流电压 U_{dc} 的变换基本维持在很小的范围内, 可以把 U_{dc} 当成定值看待, 于是 U_{dc} 导数为 0, 最后就可以得到超级储能制动电容二阶数学模型:

$$\begin{cases} \dot{i}_d = -\frac{R}{L}i_d + \omega i_q - \frac{1}{L}KU_{dc} \cos \alpha + \frac{\sqrt{2}}{L}U_s \\ \dot{i}_q = -\frac{R}{L}i_q - \omega i_d - \frac{1}{L}KU_{dc} \sin \alpha \end{cases} \quad (2)$$

图 4 中水轮机采用工程上常用的三阶模型来描述快速励磁系统过程, 并与 SCBD 二阶数学模型联合可得如下的五阶微分方程。

$$\begin{cases} \dot{E}'_q = -\frac{1}{T'_{d0}}[U_{sd} + x_d i_{gd} - u_f] \\ \dot{\delta} = (\omega - 1)\omega_0 \\ \dot{\omega} = \frac{1}{T_j}(P_m - P_e) - \frac{D}{T_j}(\omega - 1) \\ \dot{i}_d = -\frac{R}{L}i_d + \omega i_q + \frac{K}{L}U_{dc} \cos a - \frac{\sqrt{2}}{L}U_s \\ \dot{i}_q = -\frac{R}{L}i_q - \omega i_d + \frac{K}{L}U_{dc} \sin a \end{cases} \quad (3)$$

式中: E'_q 、 δ 、 ω 、 ω_0 为发电机暂态电势、功角、角速度、同步转速; u_f 为励磁电压控制量; T'_{d0} 、 T_j 为相应的时间常数; D 为发电机阻尼系数。

$$\begin{cases} i_{gd} = (E'_q - U \cos \delta - x_e i_d)/(x'_d + x_e) \\ i_{gq} = (U \sin \delta + x_e i_q)/(x_q + x_e) \\ U_g^2 = (x_q i_{gq})^2 + (E'_q - x'_d i_{gd})^2 \\ P_e = [E'_q + (x_q - x'_d) i_{gq}] i_{gq} \\ P_{ss} = x_q i_{gq} i_d + (E'_q - x'_d i_{gd}) i_q \\ Q_{ss} = (E'_q - x'_d i_{gd}) i_d - x_q i_{gq} i_q \end{cases} \quad (4)$$

假设系统的状态变量为: $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]^T = [E'_q, \delta, \omega, i_d, i_q]^T$; 代数约束变量: $\mathbf{w} = [w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6]^T = [i_{gd}, i_{gq}, U_g, P_e, P_{ss}, Q_{ss}]^T$; 控制量向量: $\mathbf{u} = [u_1, u_2, u_3]^T = [u_f, u_k, u_a]^T$; 则原控制系统的微分方程(3)转化为 MIMO 非线性微分代数系统。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{w}) + \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{w})\mathbf{u} \\ \mathbf{p}(\mathbf{x}, \mathbf{w}) = 0 \\ \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \end{cases} \quad (5)$$

2.3 基于 DAMNC 的 SCBD 控制器设计

2.3.1 DAMNC 的设计原理

DAMNC 方法核心就是引入 M 导数、M 括号、相对阶的概念, 通过合适的坐标变换来建立非线性系统和线性系统的映射关系, 将非线性的控制问题转换到线性空间来解决, 通过选取目标函数在线性空间的约束控制来实现非线性控制中的性能需求。考虑将输出函数 $\mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{w})$ 选取为如式(6)表示的状态

量 \mathbf{x} 和约束量 \mathbf{w} 的线性组合；再通过非线性变换 $\mathbf{i} = \Phi(\mathbf{x}, \mathbf{w})$ 将原系统转换为 i 空间的线性和非线性的子系统。

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{w}) = \begin{bmatrix} h_1(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \\ \vdots \\ h_l(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \end{bmatrix} = \mathbf{C}_1 \mathbf{x} + \mathbf{C}_2 \mathbf{w} \quad (6)$$

式中, \mathbf{C}_1 、 \mathbf{C}_2 分别为状态变量 \mathbf{x} 和代数约束 \mathbf{w} 参数矩阵。

然后对 $\mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{w})$ 进行坐标变换可得 $\mathbf{i} = \Phi(\mathbf{x}, \mathbf{w})$ 如式(7)所示。

$$\mathbf{i} = \begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_{\beta_1} \\ \vdots \\ i_{\beta_{p-1}+1} \\ \vdots \\ i_{\beta_p} \\ i_{\beta_{p+1}} \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \\ \vdots \\ M_f^{n-1} h_1(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \\ \vdots \\ h_p(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \\ \vdots \\ M_f^{r-1} h_p(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \\ \eta_1(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \\ \vdots \\ \eta_{n-\beta_p}(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_1(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \\ \vdots \\ \varphi_{\sigma_1}(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \\ \vdots \\ \varphi_{\sigma_{p-1}+1}(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \\ \vdots \\ \varphi_r(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \\ \eta_1(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \\ \vdots \\ \eta_{n-\beta_p}(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \end{bmatrix} = \Phi(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \quad (7)$$

式(7)中:

$$\begin{cases} \dot{i}_1 = \dot{i}_2, \dot{i}_2 = \dot{i}_3, \dots, \dot{i}_{\beta_1} = v_1 \\ \dots \\ \dot{i}_{\beta_{p-1}+1} = \dot{i}_{\beta_{p-1}+2}, \dot{i}_{\beta_{p-1}+2} = \dot{i}_{\beta_{p-1}+3}, \dots, \dot{i}_{\beta_{p-1}+3} = v_p \\ \dot{i}_{\beta_p+1} = \dot{\eta}_1(\mathbf{x}, \mathbf{w}), \dot{i}_{\beta_p+2} = \dot{\eta}_2(\mathbf{x}, \mathbf{w}), \dots, \dot{i}_n = \dot{\eta}_{n-\beta_p}(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{g1} M_f^{n-1} h_1 & \dots & M_{gp} M_f^{n-1} h_1 \\ \vdots & & \vdots \\ M_{g1} M_f^{r-1} h_p & \dots & M_{gp} M_f^{r-1} h_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_f^n h_1 \\ \vdots \\ M_f^r h_p \end{bmatrix} = \mathbf{B} \mathbf{u} + \mathbf{p} \quad (9)$$

式(9)中 $\mathbf{v} = [v_1 \dots v_p]^T = \mathbf{B} \mathbf{u} + \mathbf{p}$, 其中系统(5)被转化为可控部分 $(i_1, \dots, i_{\beta_1}, \dots, i_{\beta_{p-1}+1}, \dots, i_{\beta_p})$ 和不可控非线性部分 $(i_{\beta_{p+1}}, \dots, i_n)$ 两部分, 可控线性部分是由 p 个布鲁诺斯线性部分组成的, 采用 LOC 方法来求解每个布鲁诺斯系统。然后设计出最优控制率 \mathbf{v} , 然后反解出 \mathbf{u} : $\mathbf{u} = -\tilde{\mathbf{B}}^{-1}(\mathbf{p} + \mathbf{K} \mathbf{i})$ 。其中, \mathbf{K} 为 $p \times r$ 阶参数矩阵。

将 $\mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{w})$ 代入上式可得到 $\mathbf{x}-\mathbf{w}$ 空间的实际 DAMNC 控制律为:

$$\mathbf{u} = -\tilde{\mathbf{B}}^{-1}(\mathbf{C}_1 \mathbf{x} + \mathbf{C}_2 \mathbf{w} + \mathbf{K} \mathbf{i}) + \mathbf{u}_0 = -\tilde{\mathbf{B}}^{-1} \left(\mathbf{C}_1 \begin{bmatrix} M_{f-f_0}^n \mathbf{x}_1 \\ \vdots \\ M_{f-f_0}^n \mathbf{x}_n \end{bmatrix} + \mathbf{C}_2 \begin{bmatrix} M_{f-f_0}^n \mathbf{w}_1 \\ \vdots \\ M_{f-f_0}^n \mathbf{w}_n \end{bmatrix} + \mathbf{K} \begin{bmatrix} i_1 - i_{10} \\ \vdots \\ i_r - i_{r0} \end{bmatrix} \right) + \mathbf{u}_0 \quad (10)$$

式(8)中, 控制律 \mathbf{u} 由控制量的初值 \mathbf{u}_0 和抗干扰项组合而成, 其中:

$$\tilde{\mathbf{B}}(\mathbf{x}, \mathbf{w}) = \begin{bmatrix} M_{g1} M_f^{n-1} h_1(\mathbf{x}, \mathbf{w}) & \dots & M_{g1} M_f^{n-1} h_1(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \\ \vdots & & \vdots \\ M_{g1} M_f^{r-1} h_r(\mathbf{x}, \mathbf{w}) & \dots & M_{gr} M_f^{r-1} h_r(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \end{bmatrix}$$

2.3.2 控制律的设计

选取 $\mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{w})$ 为全状态量 \mathbf{x} 和全约束量 \mathbf{w} 的线性组合形式:

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{w}) = [h_1(\mathbf{x}, \mathbf{w}), h_2(\mathbf{x}, \mathbf{w}), h_3(\mathbf{x}, \mathbf{w})]^T = c_1^{3 \times 5} \mathbf{x} + c_2^{3 \times 6} \mathbf{w} \quad (11)$$

选取输出函数为

$$\begin{cases} h_1(\mathbf{x}, \mathbf{w}) = c_1 \Delta \omega + c_2 \Delta U_g \\ h_2(\mathbf{x}, \mathbf{w}) = c_3 \Delta i_d + c_4 \Delta P_{ss} \\ h_3(\mathbf{x}, \mathbf{w}) = c_5 \Delta U_g + c_6 \Delta i_q \end{cases} \quad (12)$$

式中:

$$\mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{24} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{36} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \tilde{c}_{13} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \tilde{c}_{26} & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{c}_{33} & 0 & 0 & \tilde{c}_{36} \end{bmatrix}$$

计算 $\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{w}}$ 、 $\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{x}}$, 代入 \mathbf{B} 矩阵进行 M 导数计算

可得

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} M_{g1} M_f^0 h_1 & M_{g2} M_f^0 h_1 & M_{g3} M_f^0 h_1 \\ M_{g1} M_f^0 h_2 & M_{g2} M_f^0 h_2 & M_{g3} M_f^0 h_2 \\ M_{g1} M_f^0 h_3 & M_{g2} M_f^0 h_3 & M_{g3} M_f^0 h_3 \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: $M_{gi} M_f^0 h_j = \left\{ \frac{\partial h_j}{\partial \mathbf{x}} - \frac{\partial h_j}{\partial \mathbf{w}} \left[\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{w}} \right]^{-1} \frac{\partial h_j}{\partial \mathbf{x}} \right\} \mathbf{g}_i$ ($i, j = 1, 2, 3$)

将系统初始工况平衡点代入 \mathbf{B} 中可知矩阵为满秩矩阵, 相对阶为 $r = 3 < 5$ 。需要在构造两个光滑函数满足 $M_{gi} \eta_j(\mathbf{x}, \mathbf{w}) = 0$ ($i, j = 1, 2$) 就可以构成非线性变换, 坐标变换满足以下关系:

$$\Phi(\mathbf{x}, \mathbf{w}) = \mathbf{i} = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \\ h_2(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \\ h_3(\mathbf{x}, \mathbf{w}) \\ \Delta \delta \\ \Delta \omega \end{bmatrix} \quad (14)$$

最后可以求出 DAMNC 的控制律 \mathbf{u} 。

$$u = -\tilde{B}^{-1}(C_1 x + C_2 w + Ki) + u_0 = -\tilde{B}^{-1} \left(C_1 \begin{bmatrix} M_{f-f_0}^n x_1 \\ \vdots \\ M_{f-f_0}^n x_n \end{bmatrix} + C_2 \begin{bmatrix} M_{f-f_0}^n w_1 \\ \vdots \\ M_{f-f_0}^n w_n \end{bmatrix} + K \begin{bmatrix} i_1 - i_{10} \\ \vdots \\ i_r - i_{r0} \end{bmatrix} \right) + u_0 \quad (15)$$

2.4 算例仿真分析

2.4.1 算例简介

为了验证 SCBD 在改善系统稳定性中所起作用以及 DAMNC 方法的优越性, 本节在 Matlab 仿真软件对所设计的 SCBD 控制器进行仿真, 算例以广西某 304 MW 水轮机为实例, 主要参数: $x_d = 1.09$ p.u., $x_q = 0.728$ p.u., $x'_d = 0.3399$ p.u., $T_j = 7$ s, $T'_{d0} = 6.2$ s, $D = 2$ s. 变压器及线路参数 $x_r = 0.169$ p.u., $x_l = 0.075$ 16 p.u. 系统初始运行工况: 注入到无穷大电网功率 $P_0 = 0.9$ p.u., $Q_0 = 0.06$ p.u., 初始运行功角 $\delta = 41.2$, 机端电压为 $U_{g0} = 1.052$ p.u., $E'_{q0} = 1.376$ 65 p.u..

2.4.2 实例计算

DAMNC 控制律选取的系数矩阵和 i 空间反馈系数 K 选取为

$$C_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -10.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix}; \quad C_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} -4 & 0 & 0 \\ 0 & -18 & 0 \\ 0 & 0 & -3 \end{bmatrix}$$

借助哈尔曼-格鲁勃曼定理可以将该系统的一次近似系统的闭环特征根配置如下位置:

$s_1 = -7.12 + j3.13$, $s_2 = -7.12 - j3.13$, $s_3 = -0.78$, $s_4 = -2.00$, $s_5 = -18.00$, $s_6 = -11$, $s_7 = -6$. 对应零动态的极点为 s_1 , s_2 , s_3 , s_4 的特征值, 根据李雅普诺夫第一方法可知该系统在平衡点是渐进稳定的。

为了方便对比, 本文采用了线性最优(LOC)方法来求取该 SCBD 控制器的控制律。

$$v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11}(\omega - \omega_0) + k_{12}(U_g - U_{g0}) \\ k_{21}(i_d - i_{d0}) + k_{22}(P_{ss} - P_{ss0}) \\ k_{31}(U_g - U_{g0}) + k_{32}(i_q - i_{q0}) + k_{33}(Q_{ss} - Q_{ss0}) \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中参数矩阵 $K1$ 配置为

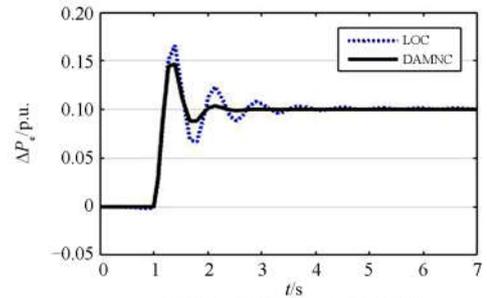
$$K1 = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -30 & -2 & 0 \\ -3 & -10 & 0 \\ -10 & -3 & -1 \end{bmatrix}$$

2.5 仿真分析

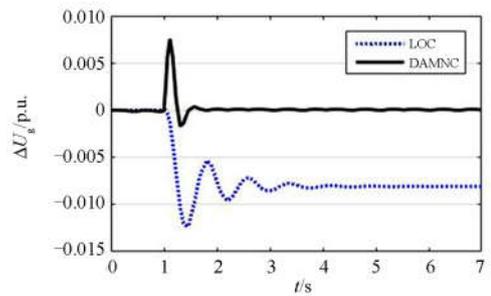
本小节主要仿真: (1) 有功功率扰动, (2) 在相同 DAMNC 方法下, 有、无 SCBD 的三相短路扰动。

2.5.1 有功功率扰动

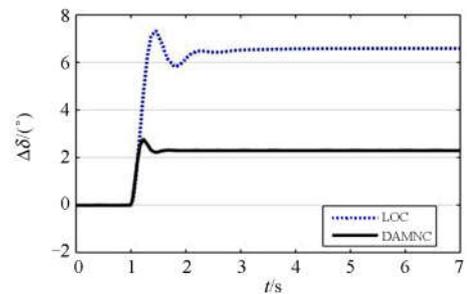
输入功率调节主要考查发电机输入功率发生变化时, 所设计控制器对有功功率、稳定发电机端电压和功角的调节能力以及各个状态量的静态性能。1 s 时, 把输入功率 P_m 的初始值上调 10%, 系统各状态量的响应曲线如图 5(a)~图 5(e) 所示。图 5(a) 可知 DAMNC 方法设计的控制器能迅速跟踪到给定值, ΔP_e 超调量更小, 动态曲线更加平滑。图 5(b)、图 5(c) 可知两种方法设计的控制器功角曲线随着输入功率的增加使得功角也拉大, 符合发电机的功角特性, DAMNC 方法很好地跟踪了机端电压, 但 LOC 方法的功角拉升过大使得机端电压下降了 0.8%, 发生了静态偏差, 但是符合电力系统电压 $\pm 5\%$ 的偏差范围。图 5(d) 可知 DAMNC 方法控制的 SCBD 在输入功率调节时提供的无功补偿更多, 利于机端电压的稳定。



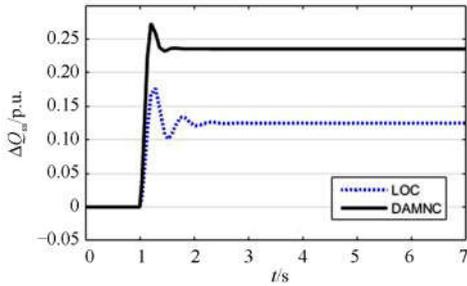
(a) 输入功率扰动 ΔP_e 对比曲线



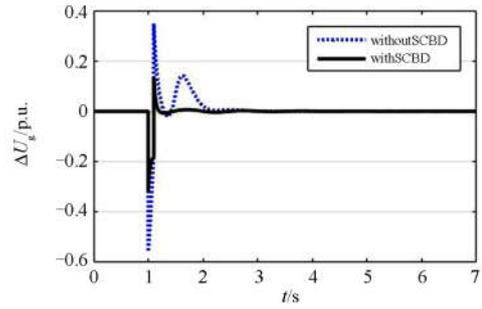
(b) 输入功率扰动 ΔU_g 对比曲线



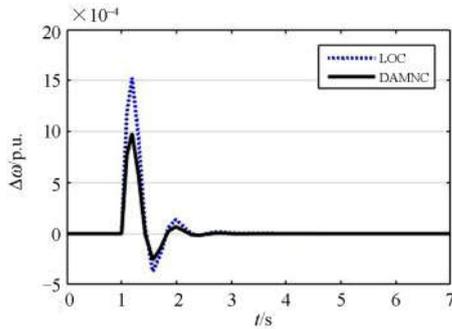
(c) 输入功率扰动 $\Delta \delta$ 对比曲线



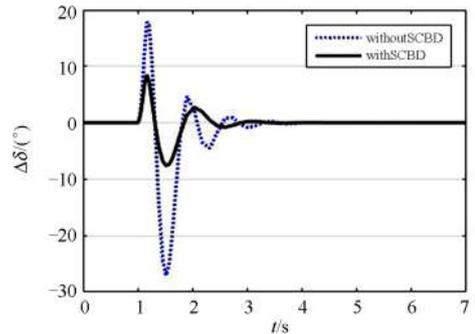
(d) 输入功率扰动 ΔQ_g 仿真曲线



(b) 三相短路扰动 ΔU_g 对比曲线



(c) 输入功率扰动 $\Delta \omega$ 对比曲线



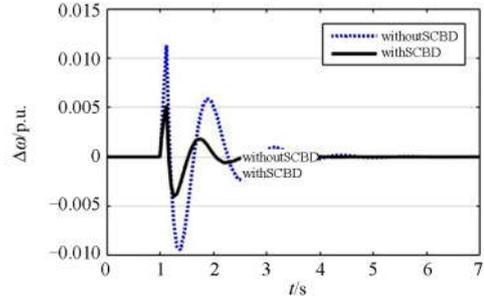
(c) 三相短路扰动 $\Delta \delta$ 对比曲线

图 5 输入功率扰动时响应曲线

Fig. 5 Response curve of input power disturbance

2.5.2 三相短路扰动

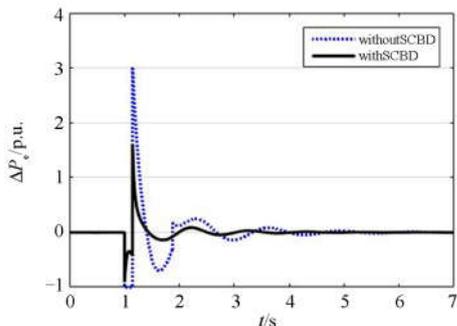
系统在1 s时发生三相短路故障,0.12 s后故障切除,重合闸成功。系统的动态响应曲线如图6(a)—图6(d)所示,由图6(a)可以明显看出机端并联SCBD的发电机系统在短路瞬间电磁功率就开始回升且超调量小,而无SCBD的发电机系统故障切除后,电磁功率才开始回升且电磁功率的超调量较大,从而论证了SCBD在短路瞬间就开始吸收短路故障的功率,从而很好地提高了系统的暂态稳定性。对比图6(b)—图6(d)可知装设有SCBD比不装设SCBD的发电机系统的各个状态变量的超调量更小,平息到稳定状态更快。因此,SCBD在短路故障时可以快速制动,更好地抑制了发电机组的机械振荡,维持发电机功角稳定,使得系统电压也得到很好的改善。



(d) 三相短路扰动 $\Delta \omega$ 对比曲线

图 6 三相短路扰动时有、无 SCBD 的响应曲线

Fig. 6 Responses of the system to the disturbance of a three-phase short circuit with or without SCBD



(a) 三相短路扰动 ΔP_e 对比曲线

3 结论

SCBD 作为一种新型储能制动装置,能迅速吸收系统过量的电磁功率来快速制动,抑制发电机的阻尼振荡,提高了系统的暂态稳定性;同时还可以向系统提供一定的功率支撑,维持机端电压稳定和改善电能质量等。本文介绍了 SCBD 在停机过程过程的制动原理,并着重分析 SCBD 控制器在短路故障中所起的作用,以水轮机励磁系统为切入点,对 SCBD 和水轮机励磁系统进行控制器设计。Matlab 仿真实验说明:SCBD 能对短路故障进行有效制动,明显提高了系统的暂态稳定性,也很好地协调了动态、静态性能。

参考文献

- [1] 李春曦, 王佳, 叶学民, 等. 我国新能源发展现状 & 前景[J]. 电力科学与工程, 2012, 28(4): 1-8.
LI Chunxi, WANG Jia, YE Xuemin, et al. Present situation and prospect of new energy development in China [J]. Electric Power Science and Engineering, 2012, 28 (4): 1-8.
- [2] 兰洲, 倪以信, 甘德强. 现代电力系统暂态稳定控制研究综述[J]. 电网技术, 2005, 29(15): 40-47.
LAN Zhou, NI Yixin, GAN Deqiang. A survey on transient stability control of modern power systems[J]. Power System Technology, 2005, 29(15): 40-47.
- [3] 王钊, 赵智博, 关士友. 超级电容器的应用现状及发展趋势[J]. 江苏科技信息, 2016(27): 69-73.
WANG Zhao, ZHAO Zhibo, GUAN Shiyu. Application status and development trend of super capacitor[J]. Jiangsu Science and Technology Information, 2016(27): 69-73.
- [4] 阮殿波, 郑超, 陈雪, 等. 超级电容器百篇论文点评 (2015.8.1-2015.10.31)[J]. 储能科学与技术, 2016, 5(1): 31-43.
RUAN Dianbo, ZHENG Chao, CHEN Xue, et al. Review of one hundred papers on Super capacitor (2015.8.1-2015.10.31)[J]. Energy Storage Science and Technology, 2016, 5(1): 31-43.
- [5] 赵晋泉, 邓晖, 吴小辰, 等. 基于广域响应的电力系统暂态稳定控制技术评述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 1-9.
ZHAO Jingquan, DENG Hui, WU Xiaochen, et al. Review on power system transient stability control technologies based on PMU/WAMS[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 1-9.
- [6] 汤凡, 刘天琪, 李兴源. 通过串联制动电阻改善恒速异步发电机风电场的暂态稳定性[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 163-167.
YANG Fan, LIU Tianqi, LI Xingyuan. Improvement of transient stability of wind farm with constant speed induction generator by series resistance[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 163-167.
- [7] 陈遗志, 刘国华, 仲旻, 等. 水电机组电气制动的设计及应用[J]. 水电厂自动化, 2007(4): 167-170.
CHEN Yizhi, LIU Guohua, ZHONG Min, et al. Design and application of electrical braking of hydropower unit[J]. Hydropower Plant Automation, 2007(4): 167-170.
- [8] 谭娟, 刘光权, 杨艳. 大型水轮发电机组电气制动技术在三峡水电站的应用[J]. 水电自动化与大坝监测, 2012, 36(1): 34-37.
TAN Juan, LIU Guangquan, YANG Yan. Electric braking technology for large hydraulic generating units in three gorges hydropower plant[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2012, 36(1): 34-37.
- [9] 王虹富, 林国庆, 邱家驹, 等. 利用串联制动电阻提高风电场低电压穿越能力[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(18): 81-85.
WANG Hongfu, LIN Guoqing, QIU Jiaju, et al. Improvement of low voltage ride-through capability of wind farms by use of series dynamic braking resistors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(18): 81-85.
- [10] 崔建业, 骆济寿, 彭文娟. 用先进的动态电气制动提高电力系统稳定性[J]. 电网技术, 1997, 21(18): 23-27.
CUI Jianye, LUO Jishou, PENG Wenjuan. Improve power system stability by advanced dynamic braking[J]. Power System Technology, 1997, 21(18): 23-27.
- [11] 王振浩, 刘宇男, 张明江, 等. 基于双向 DC/AC 变换器的混合储能系统动态控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 26-32.
WANG Zhenhao, LIU Yunan, ZHANG Mingjiang, et al. Dynamic control strategy for hybrid energy storage system based on bi-directional DC/AC converters[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 26-32.
- [12] 李宗泽, 史成军. 基于二维云模型同步发电机 PID 励磁系统仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 19-24.
LI Zongze, SHI Chengjun. Simulation of PID excitation system of synchronous generator based on two dimensional cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 19-24.
- [13] 汪旋, 刘辉, 陈武晖, 等. 水轮发电机组励磁与水门协调控制设计[J]. 电工技术学报, 2013, 28(7): 262-268.
WANG Ni, LIU Hui, CHEN Wuhui, et al. Design of coordinated control of excitation and water gate for hydroelectric generating set[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(7): 262-268.
- [14] 李啸骢, 邓裕文, 游晓枫, 等. 单输入单输出微分代数系统的多指标非线性控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 47-52.
LI Xiaocong, DENG Yuwen, YOU Xiaofeng, et al. Multi-index nonlinear control design for SISO differential algebraic system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 47-52.
- [15] 李啸骢, 郑涛, 梁志坚, 等. 水轮机水门、励磁与电气制动系统非线性综合控制[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(7): 97-103.
LI Xiaocong, ZHENG Tao, LIANG Zhijian, et al. Calculation of worst working point and anti-demagnetization structure for line-start permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7): 97-103.

收稿日期: 2017-05-05; 修回日期: 2017-07-12

作者简介:

李啸骢(1959-), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为控制系统计算机辅助设计、电力系统动态仿真及计算机实时控制、电力系统分析与控制; E-mail: lhtlht@gxu.edu.cn

龚彪(1990-), 男, 硕士研究生, 通信作者, 研究方向为电力系统稳定与控制。E-mail: borisgong53@163.com

(编辑 张爱琴)