

应用飞轮储能系统阻尼电力系统低频振荡

史林军^{1,2}, 陈 中¹, 王海风¹, 唐国庆¹

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏省南京市 210096; 2. 河海大学能源与电气学院, 江苏省南京市 210098)

摘要: 飞轮储能系统(FESS)具有独立的有功和无功功率调节能力,通过适当的控制策略补偿系统振荡功率,能快速平息振荡,达到抑制低频振荡的目的。文中应用阻尼转矩法从理论上分析了 FESS 阻尼系统低频振荡的机理,并在此基础上提出 FESS 最佳安装地点、阻尼控制器回路、反馈信号的选择及附加阻尼控制参数整定的解决方法。以 4 机系统为例,特征值计算和时域仿真都表明了分析结果的正确性。

关键词: 飞轮储能系统; 低频振荡; 双馈感应电机; Phillips-Heffron 模型; 阻尼转矩分析

0 引言

随着电力电子、材料等技术的发展,飞轮储能系统(FESS)在电力系统中的应用受到越来越多的关注,包括电力调峰、提高系统稳定性和供电质量^[1-4]。FESS 通过电机与系统交换能量,文献[5-6]以双馈感应电机(DFIM)作为 FESS 的电机,不仅具有独立的有功和无功调节能力,而且转子侧的变频器只需交换滑差功率,更具经济性和实用性,因此本文以 DFIM 作为 FESS 的电机。

到目前为止,应用 FESS 抑制低频振荡的研究尚不多见。文献[7]采用线性化等面积法则和小干扰分析法,提出了储能系统抑制单机无穷大系统低频振荡的一种图解性的直观方法,但没有从理论上给予证明。文献[8]采用特征值分析方法研究了储能装置改善阻尼的作用,得出了储能装置能增加系统的总阻尼资源并优化阻尼分配的结论,但没有给出控制器参数整定方法。

本文针对 FESS 抑制低频振荡的机理和阻尼控制器参数整定展开研究。在推导出含有 FESS 的多机系统的 Phillips-Heffron 模型基础上,应用阻尼转矩分析(DTA)法从理论上分析 FESS 抑制系统低频振荡的机理,并提出 FESS 最佳安装地点、阻尼控制回路、反馈信号的选择以及阻尼控制器参数整定的解决方法。

1 FESS 的数学模型及励磁控制策略

FESS 的能量储存在其旋转的转子上,调节飞轮的转速,通过 DFIM 即可实现 FESS 与系统间的能量交换,其接入系统如图 1 所示。图中: $\dot{U}_s$ 为

FESS 端口电压; $\dot{U}_1$ 为 FESS 接入系统的母线电压; $\dot{I}_D$ 为注入系统的负电流; $\dot{I}_{ss}$ 和 $\dot{I}_{sr}$ 分别为定、转子电流。

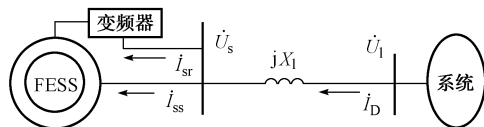


图 1 FESS 接入系统
Fig. 1 A FESS connected to power system

1.1 FESS 的 3 阶简化动态模型

DFIM 的数学模型在文献[6,9-11]中已经有详细的讨论,在文献[10]中还给出了 3 阶和 5 阶动态模型的比较,并且指出对于电力系统稳定的研究,3 阶动态模型已经足够。

本节论述的模型采用电动惯例,且坐标已转换至自身的 $d-q$ 坐标系上。

转子运动方程(忽略阻尼转矩)为:

$$T_j \frac{ds}{dt} = T_m - T_e \quad (1)$$

式中: T_j 为电机惯性时间常数; $s = (\omega_0 - \omega_r) / \omega_0$, 为转差率; ω_r 为转子角速度; ω_0 为同步转速; T_e 为电磁转矩;对于 FESS, $T_m = 0$ 。

定子电压方程为:

$$\begin{cases} U_{ds} = E_{dd}' - x' I_{qs} \\ U_{qs} = E_{qq}' + x' I_{ds} \end{cases} \quad (2)$$

式中: U_{ds} 和 U_{qs} 分别为 DFIM 定子 d, q 轴上的电压; I_{ds} 和 I_{qs} 分别为 DFIM 定子 d, q 轴上的电流; E_{dd}' 和 E_{qq}' 为 DFIM 的暂态电势; $x' = x_{ss} - x_m^2 / X_{rr}$; $X_{rr} = x_r + x_m$; x_r 和 x_m 分别为转子漏电抗、励磁电抗; $x_{ss} = x_s + x_m$; x_s 为定子漏电抗。

$$\begin{cases} \frac{dE_{dd}'}{dt} = -\frac{\omega_0 x_m}{X_{rr}} U_{qr} - \frac{E_{dd}'}{T_{d0}} + s\omega_0 E_{qq}' - \frac{x_{ss} - x'}{T_{d0}} I_{qs} \\ \frac{dE_{qq}'}{dt} = \frac{\omega_0 x_m}{X_{rr}} U_{dr} - \frac{E_{qq}'}{T_{d0}} - s\omega_0 E_{dd}' + \frac{x_{ss} - x'}{T_{d0}} I_{ds} \end{cases} \quad (3)$$

式中: U_{dr} 和 U_{qr} 分别为转子 d, q 轴上的电压; $T_{d0}' = X_{rr}/(\omega_0 r_r)$; r_r 为转子电阻。

式(1)、式(3)即为 FESS 的 3 阶动态模型。

1.2 FESS 的励磁控制策略

DFIM 的励磁控制一般采用定子磁场定向控制策略^[6,9-10], 即 q 轴是以并联接入点电压相量为参考, 滞后其 90° 的轴为 d 轴, 实现 U_{qr} 控制有功功率、 U_{dr} 控制无功功率的近似解耦控制, 并得到慢速的功率外环和快速的电流内环的双闭环控制结构^[11]。为了简化分析, 将快速的电流内环简化为纯增益控制, 功率外环采用 PI 控制, 且无功控制可转化为电压控制^[6], 如图 2 和图 3 所示。图中: $K_{pp}, K_{ip}, K_{pu}, K_{iu}, K_{pi}$ 为比例积分系数; P_{ref} 为 FESS 注入系统的参考功率; P_s 为定子侧输出有功功率; P_r 为转子侧输出有功功率, 由于转子侧与系统存在有功交换, 因此有功指令中加入转子有功补偿; U_{qsref} 为 FESS 的 q 轴参考电压。

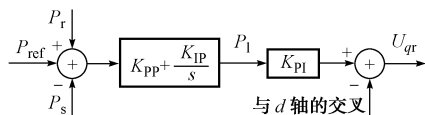


图 2 有功控制回路

Fig. 2 Active power control loop

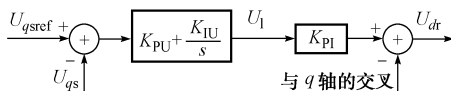


图 3 电压控制回路

Fig. 3 Voltage control loop

仅有功和电压控制时, 其目的是控制输出有功和母线电压恒定, 并不能补偿振荡功率, 解决方法是在控制回路上附加阻尼控制, 其形式如图 4 所示。

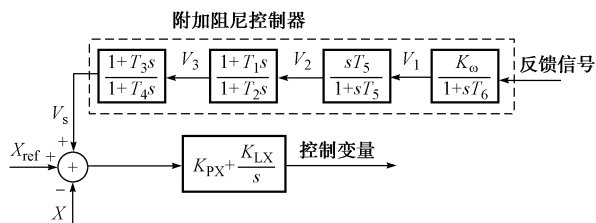


图 4 阻尼控制器

Fig. 4 Damping controller

图 4 中: V_s 为阻尼控制器输出信号, 可以附加到有功或电压控制回路上; K_ω 为阻尼控制器增益;

K_{px} 和 K_{lx} 为比例积分系数。当电力系统发生低频振荡时, 根据系统振荡及时调整 V_s , 实现 FESS 能量储存或释放, 若恰能补偿系统振荡功率, 则能快速平息振荡, 这是 FESS 抑制低频振荡的物理解释, 第 3 节将从理论上给予证明。

2 含 FESS 的多机系统 Phillips-Heffron 模型

应用注入电流法^[12]推导含 FESS 的全系统线性化模型。由图 1 可知, FESS 注入系统电流包括定子电流和转子电流两部分, 即

$$\dot{I}_D = \dot{I}_{ss} + \dot{I}_{sr} \quad (4)$$

不失一般性, 设系统中有 N 台同步发电机, 则全系统网络方程为^[12]:

$$\begin{bmatrix} \Delta I_G \\ \Delta I_D \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{GG} & Y_{GD} & Y_{GL} \\ Y_{DG} & Y_{DD} & Y_{DL} \\ Y_{LG} & Y_{LD} & Y_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_G \\ \Delta V_D \\ \Delta V_L \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: ΔI_G 和 ΔV_G 分别为全部发电机注入电流和节点电压偏差组成的向量; ΔI_D 和 ΔV_D 分别为 FESS 注入电流和接入系统的节点电压偏差组成的向量; ΔV_L 为其他节点电压偏差组成的向量; Y 以不同下标表示导纳矩阵块。

将式(4)在系统 $x-y$ 坐标下线性化, 代入式(5), 并消除发电机以外的所有节点, 可求出 ΔV_G , 并将其转换至发电机自身的 $d-q$ 坐标, 与发电机的端电压方程联立, 可求出:

$$\begin{cases} \Delta I_d = Y_d \Delta E_q' + L_d \Delta \delta + D_d \Delta x_D \\ \Delta I_q = Y_q \Delta E_q' + L_q \Delta \delta + D_q \Delta x_D \end{cases} \quad (6)$$

式中: $Y_d, L_d, Y_q, L_q \in \mathbb{R}^{N \times N}$, $D_d, D_q \in \mathbb{R}^{N \times 3}$, 均为系数矩阵; $\Delta E_q'$ 为发电机暂态电势增量; $\Delta \delta$ 为发电机功角增量; ΔI_d 和 ΔI_q 为发电机定子电流增量; Δx_D 为 FESS 的状态变量增量。

将式(6)代入发电机状态方程中, 得

$$\begin{cases} \Delta \dot{\delta} = \omega_0 \Delta \omega \\ \Delta \dot{\omega} = -M^{-1} (K_1 \Delta \delta + D \Delta \omega + K_2 \Delta E_q' + K_p \Delta x_D) \\ \Delta \dot{E}_q' = -(T_{d0}')^{-1} (K_4 \Delta \delta + K_3 \Delta E_q' - \Delta E_{fd} + K_q \Delta x_D) \\ (I + sT_A) \Delta E_{fd} = -K_A (K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E_q' + K_v \Delta x_D) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $K_p, K_q, K_v \in \mathbb{R}^{N \times 3}$ 为系数矩阵, 描述了 FESS 对发电机的影响。

同理, 可求出 FESS 接入系统的节点电压 ΔV_D , 并根据式(4)可求出 FESS 的注入电流, 代入式(1)和式(3)线性化后的方程中, 可得:

$$\frac{d\Delta x_D}{dt} = K_7 \Delta \delta + K_8 \Delta E_q' - K_s \Delta x_D + k_u \Delta U_r \quad (8)$$

式中: K_7 和 $K_8 \in \mathbf{R}^{3 \times N}$, 描述了发电机对 FESS 状态量的影响; $K_s \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$; $k_u \in \mathbf{R}^{3 \times 2}$, 为转子电压控制系数; $\Delta U_r = [\Delta U_{qr}, \Delta U_{dr}]^T$, 为转子电压, 是控制量。

式(7)、式(8)即为含 FESS 的多机系统 Phillips-Heffron 模型, 其关系如图 5 所示。

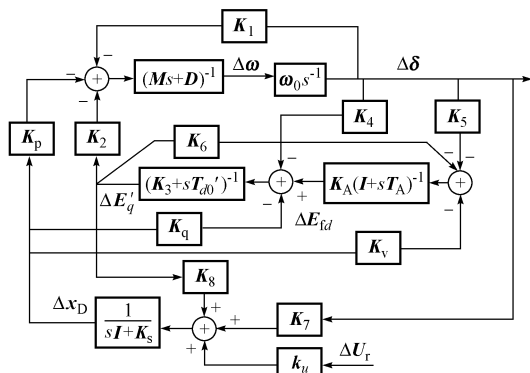


图 5 含有 FESS 的多机系统 Phillips-Heffron 模型
Fig. 5 Phillips-Heffron model of the multi-machine power system with FESS

3 FESS 阻尼低频振荡的理论分析

文献[13]已经从理论上证明了基于物理意义的阻尼转矩分析(DTA)和基于数学分析的特征值分析是等价的, 从而为 DTA 提供了严格的理论基础。文献[14]将 DTA 法扩展至包括电池储能系统(BESS)的复杂多机系统中, 揭示了 BESS 抑制低频振荡的机理。本节将 DTA 法推广到含 FESS 的多机系统, 研究 FESS 抑制低频振荡的机理, 并为 FESS 安装地点、阻尼控制信号、反馈信号的选择及附加阻尼控制器参数设计提供依据。

在有功和电压控制器闭环的情况下附加 V_s , 可得到全系统线性化方程, 并可求出 FESS 阻尼控制器向第 i 个模式、系统中的第 j 台发电机提供的阻尼转矩为^[14]:

$$T_{Dij} = F_j(\lambda_i)G(\lambda_i)\gamma_j(\lambda_i)\Delta\omega_j \quad (9)$$

式中: F_j 为从 FESS 阻尼控制器输出信号至第 j 台发电机机电振荡环节的前向通道; G 为阻尼控制器的传递函数; γ_j 为反馈信号采用各发电机的转速 $\Delta\omega_j$ 表达的重构函数。

式(9)仅表明了 FESS 向系统中每台发电机都提供阻尼转矩(与 $\Delta\omega_j$ 成正比)。能否提高模式 λ_i 的阻尼, 还与系统中各发电机参与系统振荡的程度有关, 用模式 λ_i 对第 j 台发电机机电振荡环节的阻尼转矩 T_{Dij} 的偏导数 S_{ij} 来衡量。则由 FESS 阻尼器提供的阻尼转矩使 λ_i 变化为:

$$\Delta\lambda_i = \sum_{j=1}^n S_{ij} \Delta T_{Dij} = \sum_{j=1}^n S_{ij} H_{ij} \angle \varphi_{ij} \Delta G(\lambda_i) \quad (10)$$

式中: $H_{ij} \angle \varphi_{ij} = F_j(\lambda_i)\gamma_j(\lambda_i)$ 。

由式(10)可以得到如图 6 所示的 FESS 阻尼传递图, 清晰地描述了 FESS 通过阻尼控制抑制系统低频振荡的机理, 即 FESS 阻尼控制器首先通过 $H_{ij} \angle \varphi_{ij}$ 对各台发电机提供阻尼转矩, 然后根据各台发电机对振荡模式的参与程度将阻尼转矩转化为对模式 λ_i 的阻尼, 从而从理论上得到了证明。

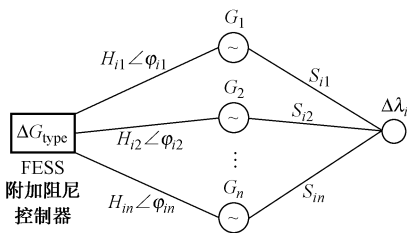


图 6 FESS 阻尼控制器对模式 λ_i 的影响
Fig. 6 Effects of FESS stabilizer on λ_i

4 应用 FESS 阻尼低频振荡

应用 FESS 阻尼系统的低频振荡, 包括安装地点、阻尼控制回路、反馈信号的选择以及附加阻尼控制器参数的整定。

定义阻尼转矩指标(DTI) η_{DTI} ^[14] 为:

$$\eta_{DTI_i} = \frac{\Delta\lambda_i}{\Delta G} = \sum_{j=1}^n S_{ij} H_{ij} \angle \varphi_{ij} \quad (11)$$

由式(11)可见, 对于相同的阻尼控制器, DTI 大即表示 FESS 对模式阻尼的影响大, 因此可在阻尼控制器的参数未知的情况下, 根据 DTI 的大小选择安装地点、阻尼控制回路和反馈信号。

阻尼控制器参数整定采用推广相位补偿法^[15]。由式(11)可将图 6 中 FESS 对 λ_i 的影响的 N 个通道合成单个通道, 如图 7 所示。

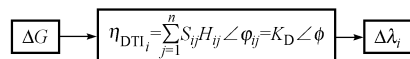


图 7 多个通道合成单个通道
Fig. 7 Synthesis of a number of channels

通过相位补偿, 可得到阻尼控制器的传递函数:

$$G(\lambda_i) = K_G \angle (\pi - \phi) = K_G \angle \varphi \quad (12)$$

式中: $\varphi = \pi - \phi$; K_G 为增益。

由式(12)和图 7 可得:

$$\Delta\lambda_i = (K_D \angle \phi) K_G \angle (\pi - \phi) = -K_D K_G \quad (13)$$

由式(12)、式(13)容易确定阻尼控制器的参数。从式(13)可看出, 设计的附加阻尼控制器直接影响模式的实部, 而对模式虚部无影响。

5 算例分析

4 机系统见附录 A 图 A1, 存在一个负阻尼的区

域模: $\lambda=0.060\ 048+j3.956\ 3$,通过安装 FESS 以提高该模式的阻尼。文献[6]提供了 FESS 的参数,容量为 70 MVA。

5.1 FESS 有功和电压控制器对系统阻尼的影响

FESS 的有功和电压控制器参数分别为: $K_{PP}=4, K_{IP}=0.08, K_{PU}=5, K_{IU}=0.1, K_{PI}=2$ 。附录 A 图 A2 是 FESS 安装在节点 7 时,对有功和电压分别施加 20 MW 和 5% 的阶跃信号的响应。从图 A2 可见,有功和电压控制器都能快速跟踪指令的变化,响应快,无超调,具有良好的动态性能。

附录 A 表 A1 表示将 FESS 分别安装在节点 7, 8, 9 时区域振荡模式的变化。从表 A1 中可见, FESS 仅有功和电压控制对系统的低频振荡影响很小。附录 A 图 A3 用时域仿真验证了 FESS 仅有功和电压控制对系统的区域振荡模式影响很小的结论。因此,需要增加附加阻尼控制来抑制系统振荡。

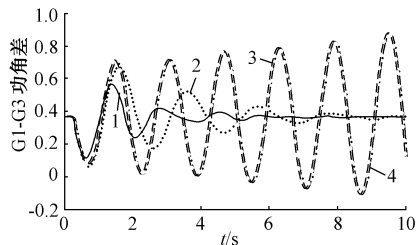
5.2 附加阻尼控制器参数整定

首先应用 DTI 选择安装地点、控制回路和反馈信号,计算结果见附录 A 表 A2。从表 A2 中可以看出:①反馈信号选择联络线的振荡功率信号优于机组间的角速度差信号;②FESS 安装在联络线中点的效果最差,安装在联络线始端效果最好;③附加阻尼控制器加载到有功控制回路上比加载在无功控制回路上效果更好。因为叠加到有功控制回路时与系统直接进行有功交换来抑制低频振荡,这与 FESS 抑制低频振荡的物理解释相符。从表 A2 中可知, FESS 应该安装在节点 7,反馈信号取线路 7-8 的振荡功率,并且应选择附加阻尼控制信号叠加到有功控制回路上。以此选择结果为例,附录 A 表 A3 说明了 FESS 阻尼系统低频振荡的过程,结合图 6 可知, FESS 向每台发电机都提供阻尼转矩,并通过各台发电机影响模式的阻尼, FESS 对模式的总影响为各条通道之和,这正是 FESS 向系统提供阻尼传递和分配的过程,也验证了 FESS 阻尼低频振荡的机理。

阻尼控制器参数整定以式(12)中 K_G 相同为条件,结果如附录 A 表 A4 所示。基于表 A4 中整定的参数,时域仿真如图 8、图 9 所示。图中, G1-G3 功角差为标么值。图 8 为 FESS 安装在节点 7,线路 9-10 末端发生 0.1 s 的三相短路时,反馈信号和控制回路比较的时域仿真图。图 9 为线路 9-10 末端发生 0.1 s 的三相短路时, FESS 不同安装地点比较的时域仿真图。从图 8 和图 9 都可以看出,时域仿真结果与表 A4 中的特征值计算一致,验证了结论的正确性。

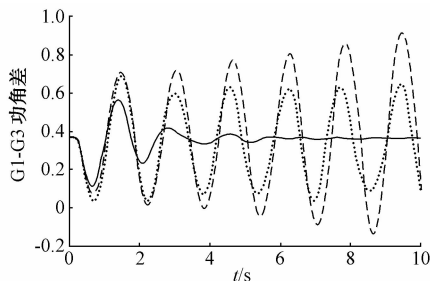
附录 A 图 A4~图 A6 为 FESS 安装于节点 7,

阻尼控制附加到有功控制回路,以线路 7-8 振荡功率为反馈信号时 FESS 输出功率、转差率变化以及线路 7-8 振荡功率的仿真图。从图中可以看出 FESS 转差变化,即调节飞轮的转速,改变 FESS 能量释放或储存,正好补偿了线路的振荡功率,从而快速平息了系统的振荡。



曲线 1: 反馈信号 P_{78} , 有功阻尼控制; 曲线 2: 反馈信号 P_{78} , 电压阻尼控制; 曲线 3: 反馈信号 ω_{13} , 有功阻尼控制; 曲线 4: 仅有功和无功控制

图 8 反馈信号、控制回路选择仿真
Fig. 8 Simulation of feed-back signal and control loop selection



— FESS 安装在节点 7; FESS 安装在节点 8; ---- 无 FESS

图 9 安装地点选择仿真
Fig. 9 Simulation of location selection

6 结语

本文应用 DTA 法从理论上分析了 FESS 抑制系统低频振荡的机理,并在此基础上提出了 FESS 最佳安装地点、反馈信号和附加阻尼控制回路的选择方法以及应用推广相位补偿法整定附加阻尼控制器参数,分析表明 FESS 安装在联络线路始端、反馈信号取联络线的振荡功率以及加载到有功控制回路上效果最好。以 4 机系统为例,特征值计算和非线性仿真都表明了分析结果的正确性。

FESS 容量对阻尼低频振荡的影响以及如何提高 FESS 的鲁棒性等是作者下一步的研究方向。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 蒋书运,卫海岗,沈祖培. 飞轮储能技术研究的发展现状. 太阳能学报, 2000, 21(4): 427-433.
JIANG Shuyun, WEI Haigang, SHENG Zupei. The situation

- of the flywheel energy storage research. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2000, 21(4): 427-433.
- [2] RIBEIRO P F, JOHNSON B K, CROW M L, et al. Energy storage systems for advanced power applications. *Proceedings of the IEEE*, 2001, 89(12): 1744-1756.
- [3] 程时杰,文劲宇,孙海顺,等. 储能技术及其在现代电力系统中的应用. *电气应用*, 2005, 24(4): 1-8.
CHENG Shijie, WEN Jinyu, SUN Haishun, et al. Application of power energy storage techniques in the modern power system. *Electrotechnical Application*, 2005, 24(4): 1-8.
- [4] WANG M H, CHEN H C. Transient stability control of multi-machine power systems using flywheel energy injection. *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, 2005, 152(5): 589-596.
- [5] 文劲宇,程时杰,李刚,等. 一种增强电力系统稳定性的多功能柔性功率调节器. *中国电机工程学报*, 2005, 25(25): 6-11.
WEN Jinyu, CHENG Shijie, LI Gang, et al. A multi-functional flexible power conditioner for power system stabilities enhancement. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(25): 6-11.
- [6] 李刚,程时杰,文劲宇,等. 利用柔性功率调节器提高电力系统稳定性. *中国电机工程学报*, 2006, 26(23): 1-6.
LI Gang, CHENG Shijie, WEN Jingyu, et al. Power system stability enhancement by the flexible power conditioner. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(23): 1-6.
- [7] 杜文娟,王海风. 应用储能系统抑制电力系统低频振荡原理研究. *电力科学与技术学报*, 2008, 23(1): 31-35.
DU Wenjuan, WANG Haifeng. Research on the principle of energy storage system damping power system oscillations. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2008, 23(1): 31-35.
- [8] 李刚,程时杰,文劲宇,等. 基于储能型稳控装置的电力系统阻尼特性分析. *电力系统自动化*, 2007, 31(17): 11-15.
LI Gang, CHENG Shijie, WEN Jingyu, et al. Analysis on the damping characteristics for a power system with energy storage stability control devices. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(17): 11-15.
- [9] EKANAYAKE J B, HOLDSWORTH L, JENKINS N. Comparison of 5th order and 3rd order machine models for doubly fed induction generator (DFIG) wind turbines. *Electric Power System Research*, 2003, 67(3): 207-215.
- [10] 乔嘉庚,鲁宗相,严慧敏,等. 双馈感应风力发电机功率控制器的建模与仿真. *电力系统自动化*, 2007, 31(24): 34-37.
QIAO Jiageng, LU Zongxiang, YAN Huimin, et al. Modeling and simulation of power controller for the doubly fed induction generator wind turbines. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(24): 34-37.
- [11] 迟永宁. 大型风电场接入电网的稳定性问题研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2006.
- [12] 王锡凡. 现代电力系统分析. 北京: 科学出版社, 2003.
- [13] SWIFT F J, WANG H F. The connection between modal analysis and electric torque analysis in studying the oscillation stability of multi-machine power systems. *Electrical Power & Energy Systems*, 1997, 19(5): 321-330.
- [14] 陈中,杜文娟,王海风,等. 基于 DTA 的储能系统抑制低系统频振荡研究. *电力系统自动化*, 2009, 33(12): 8-11.
CHEN Zhong, DU Wenjuan, WANG Haifeng, et al. Power system low-frequency oscillations suppression with energy storage system based on DTA. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(12): 8-11.
- [15] WANG H F, SWIFT F J. FACTS-based stabilizer designed by the phase compensation method: Part II multi-machine power systems// *Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management*, November 11-14, 1997, Hong Kong, China: 644-649.

史林军(1976—),男,通信作者,博士研究生,讲师,主要研究方向:电力系统分析与控制。E-mail: hlinjun@sohu.com

陈 中(1975—),男,博士,主要研究方向:电力系统稳定运行与控制、FACTS 的应用。

王海风(1960—),男,博士,教授,主要研究方向:电力系统分析与控制、FACTS 的应用。

Damping of Power System Low-frequency Oscillations with FESS

SHI Linjun^{1,2}, CHEN Zhong¹, WANG Haifeng¹, TANG Guoqing¹

(1. Southeast University, Nanjing 210096, China; 2 Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Flywheel energy storage system (FESS) can be used for damping power system low-frequency oscillations by compensating for the imbalance power with appropriate control strategy, which has an independent active and reactive power control capability. The principle of damping power system low-frequency oscillations with FESS is theoretically investigated by damping torque analysis (DTA) method. A method is also proposed to select the best installing location, damping control loop, feedback signal based on DTA and to design FESS-based stabilizer by the phase compensation method. All of the analytical conclusions have been confirmed by the results of eigenvalue calculation and non-linear simulation by a four-machine power system example.

Key words: flywheel energy storage system (FESS); low-frequency oscillations; doubly-fed induction machine (DFIM); Phillips-Heffron model; damping torque analysis (DTA)

附录 A 算例相关图表

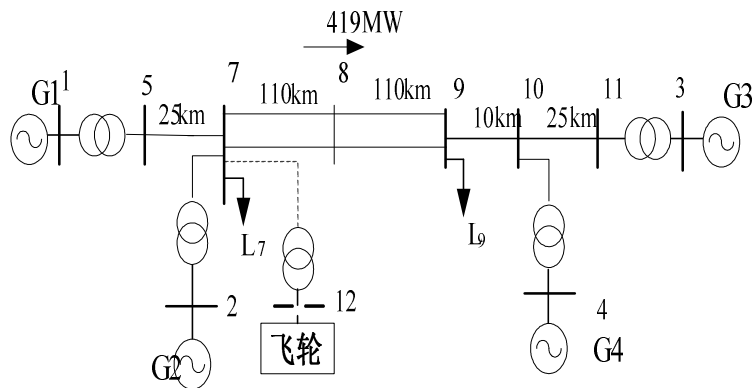
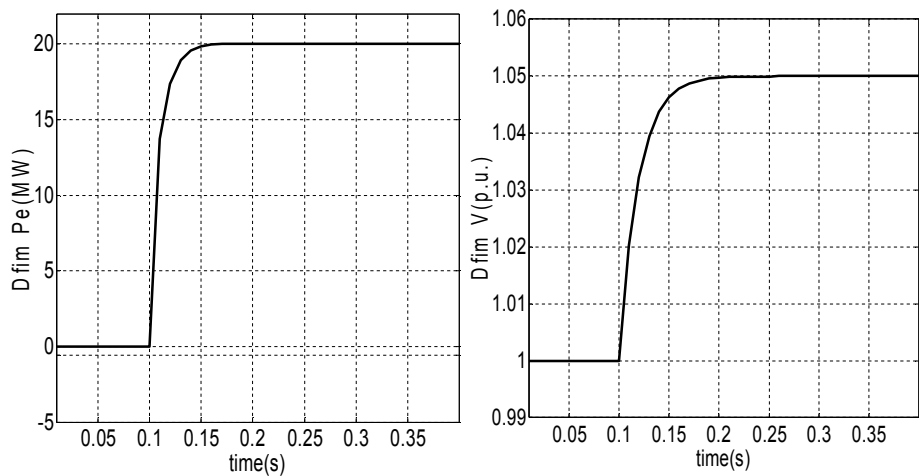


图 A1 四机系统

Fig.A1 Sample of four-machine power system



(a) 有功阶跃响应

(b) 电压阶跃响应

图 A2 有功和电压阶跃响应

Fig.A2 Step response of active power and voltage

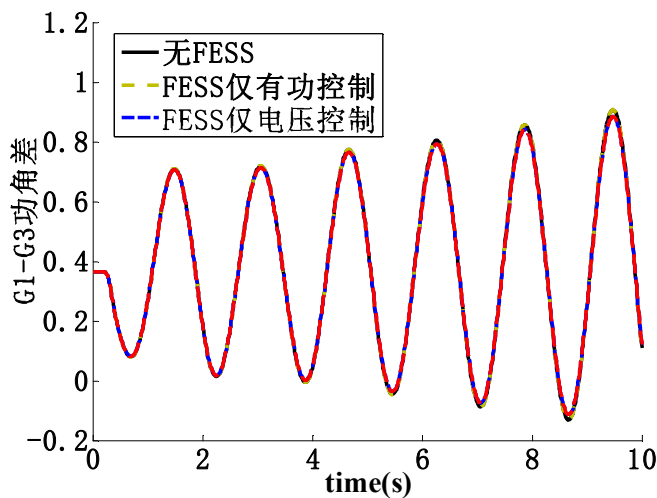


图 A3 含飞轮储能的非线性仿真

Fig.A3 Non-linear simulation with FESS installed

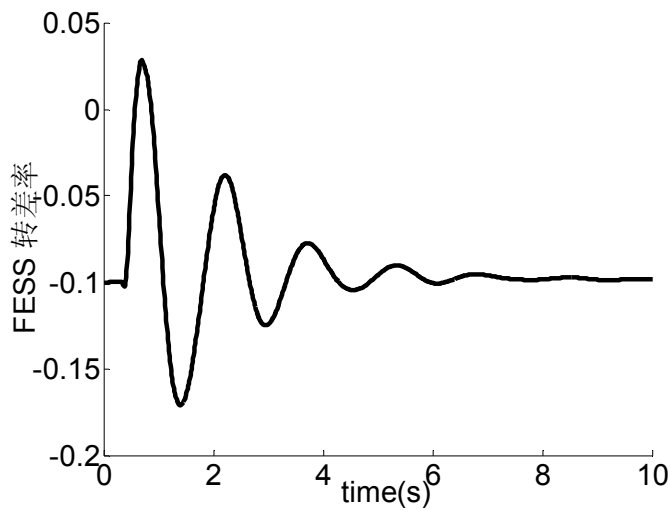


图 A4 FESS 转差率变化曲线
Fig.A4 Curve of FESS slip

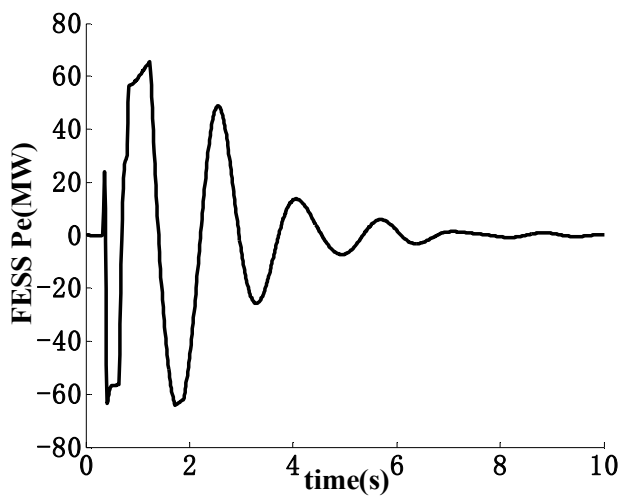


图 A5 FESS 输出功率仿真
Fig.A5 Simulation of FESS Pe

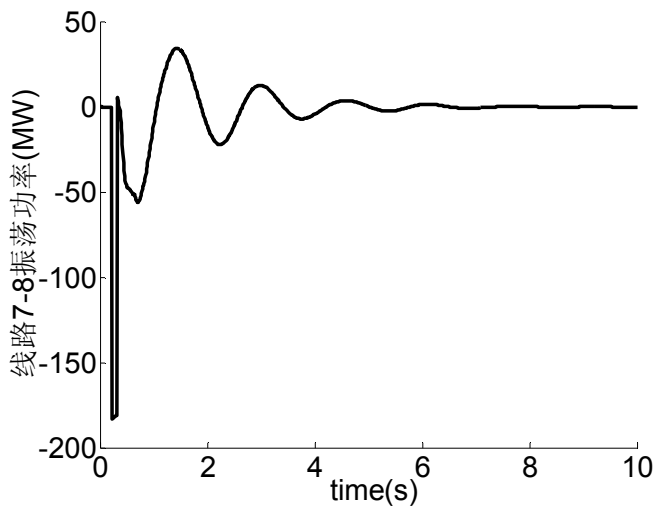


图 A6 线路振荡功率曲线
Fig.A6 Curve of line oscillations power

表 A1 含 FESS 的系统区域振荡模式
Table A1 Inter-area mode with FESS

节点	控制器	区域振荡模式
7	有功控制器	0.060054+j3.9563
	电压控制器	0.056137+j3.9535
	有功和电压	0.056137+j3.9535
8	有功控制器	0.060043+j3.9563
	电压控制器	0.059658+j3.9585
	有功和电压	0.059658+j3.9585
9	有功控制器	0.060049+j3.9563
	电压控制器	0.061752+j3.9551
	有功和电压	0.061752+j3.9551

表 A2 各种情况下的 DTI
Table A2 DTI for cases

节点	控制回路	反馈信号	DTI
7	有功控制	P_{78}	$0.2318\angle 83.6^0$
	电压控制	P_{78}	$0.2192\angle -163.5^0$
	有功控制	$\Delta\omega_{13}$	$0.0012\angle 172.5^0$
	电压控制	$\Delta\omega_{13}$	$0.0011\angle -74.5^0$
8	有功控制	P_{78}	$0.0481\angle 93.5^0$
	电压控制	P_{78}	$0.0162\angle 55.2^0$
	有功控制	$\Delta\omega_{13}$	$0.00024\angle -177.7^0$
	电压控制	$\Delta\omega_{13}$	$0.00008\angle 144.0^0$
9	有功控制	P_{78}	$0.2096\angle -99.6^0$
	电压控制	P_{78}	$0.1911\angle -52.9^0$
	有功控制	$\Delta\omega_{13}$	$0.00105\angle -10.9^0$
	电压控制	$\Delta\omega_{13}$	$0.00095\angle 35.8^0$

表 A3 式(11)中的各参数值
Table A3 Results of parameters in formula (11)

G_j	H_{ij}	$S_{ij}(\times 10^{-3})$	DTI
1	$117.9\angle -86.3^0$	$1.162\angle 173.3^0$	$0.2318\angle 83.6^0$
2	$274.3\angle -96.6^0$	$0.6278\angle 178.3^0$	
3	$24.83\angle 81.8^0$	$1.435\angle -174.8^0$	
4	$35.33\angle 85.0^0$	$1.170\angle 178.9^0$	

表 A4 附加阻尼控制器参数整定结果
Table A4 Results of FESS stabilizer parameters

场景	7	7	7	8
反馈信号	P ₇₈	P ₇₈	Δω ₁₃	P ₇₈
控制回路	有功	电压	有功	有功
T ₁	0.625	0.212	0.315	0.330
T ₂	0.100	0.300	0.300	0.050
T ₃	0.625	0.212	0.315	0.330
T ₄	0.100	0.300	0.300	0.050
K _G	2.800			
φ	96.4 ⁰	-16.5 ⁰	7.5 ⁰	86.5 ⁰
特征值	-0.5955+j3.990	-0.4350+j3.823	0.05246+j3.954	0.05184+j3.896
阻尼比（%）	14.76	11.31	-1.33	1.33

注：表中 T₁~T₄ 为图 4 中阻尼控制器传递函数参数，单位为秒。