

基于特征向量法的电池储能装置最佳安装地点选择

杜冰心,王德林

(西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 610031)

摘要: 建立一种电池储能装置(CBEST)的数学模型,分析 CBEST 的安装地点对其功率补偿效果的影响,以选择 CBEST 的最佳安装地点;在 PSS/E 中利用自定义模块建立 CBEST 控制系统的数学模型;采用小信号分析法分析特征向量法用于储能选址的可行性,并给出特征向量模值的计算过程。IEEE 9 节点系统的仿真结果验证了特征向量指标用于储能选址的准确性和有效性。

关键词: 电池; 储能; 最佳位置; 特征向量法; PSS/E 自定义模块

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.08.012

0 引言

储能技术能够对电网进行能量调节和管理,实现动态功率补偿,从而极大地增强电网运行控制的主动性。电池储能因其能量密度较高、响应时间短、对场地要求低、寿命及效率相对高,且成本低廉、制造技术成熟、能够实现大规模生产等优点,广泛使用于 UPS、电能质量调节、负荷的削峰填谷等方面,具有广阔的发展前景和巨大的应用潜力,是大规模储能技术的重要发展方向之一。电网运行工况确定以后,储能装置的布局将直接关系到对系统有功、无功功率的补偿效果,而且关系到储能的利用率和电网的经济效益。因此,需要选择储能装置在电网中合适的接入点,使其最大效能地改善系统的稳定性。本文采用电池储能装置(CBEST)旨在提高电力系统稳定性。目前针对电池储能在电力系统中最佳位置选择的研究甚少。考虑到电池储能在提高系统稳定性中所起的作用与 FACTS 装置类似,故本文参考了 FACTS 装置的选址方法。

国内外学者对 FACTS 装置在电网中接入点选择的方法进行了大量深入探讨,并取得了不少研究成果^[1-8]。文献[1]中指出留数是状态矩阵可控性因子与可观性因子的乘积,其大小表征了控制器移动特定特征值的能力,故可用留数作为储能控制器有效性的衡量指标。文献[2]利用特征根变化与留数的关系确定 PSS/FACTS 的最佳装设地点,考虑了系统的可控性和可观性,但忽视了 FACTS 装置自身控制系统对系统振荡的影响。文献[3]最早提出采用特征向量法分析发电机的振荡模态,首先求

取全系统状态矩阵的特征值和特征向量,通过分析各振荡模态的特征向量,确定对该振荡模态影响最大的发电机组。文献[4-5]采用灵敏度分析法分析了超导储能装置不同安装位置对系统特征值的影响。仿真结果表明:若某节点的灵敏度越大,其有功功率和无功功率变化对整个系统的影响也越大,该节点应为功率调节设备的最佳安装地点。另外,网络损耗最小的灵敏度分析方法的基本思想是将储能装置作为一个负荷来分析,将能量输送过程中的网络损耗作为目标函数,进行容量优化和安装方案的选择^[6]。近年来,Tabu 算法^[7]、遗传算法^[8]等智能算法也被应用到储能装置的安装选址问题中,为大规模复杂电力系统的储能优化布局开辟了新的思路。

本文首先建立了 CBEST 的数学模型,其静态控制采用可独立输出有功、无功功率的发电机模型;暂态计算采用简单的一阶惯性环节来模拟电池的充放电过程^[9-11]。通过求解不同运行工况下主导极点对应的特征向量模值,并依据模值的大小对 CBEST 接入点的优先次序进行排序,以指导 CBEST 接入点的选择。在 PSS/E 中利用自定义功能建立了有功功率控制系统数学模型,采用以发电机转子角速度偏差作为输入信号的比例-积分-微分(PID)控制^[12-15];最后在 IEEE 9 节点系统中通过在不同地点设置不同类型的故障,分析各工况下 CBEST 的最佳接入位置。

1 CBEST 的数学模型

本文在 PSS/E 仿真中采用的 CBEST 模型是 EPRI 推荐使用的 RP2123-27。CBEST 是将电池组、功率转换系统组合而成的模块化的通用电池模型,能够模拟电池的充放电特性,并经过电压源换流器接入电力系统,通过调整电池端电压实现与电网之间的功率交换。储能装置控制器能够独立控制换流器的直流电压和交流合成电压,进而控制 CBEST 的有功和无功功率。CBEST 模型不仅对转换器的交流电流值进行限幅,而且对充放电功率进行限制,以保证电池储

收稿日期:2014-09-11;修回日期:2015-04-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477143,51347007);
国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA050208)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51477143,51347007) and the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2012AA050208)

能装置工作在安全的环境下。

PSS/E 的潮流计算中,CBEST 等效为容量足够大、能够满足系统功率需求的发电机,而且为了削弱短路电流的冲击作用,一般设其阻抗为较大的数值。CBEST 的数学模型主要包括有功输出、无功输出及限幅环节,其各部分的数学框图模型分别见图 1—3。

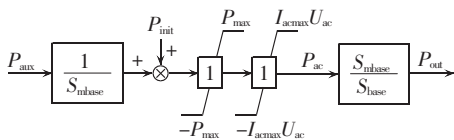


图 1 CBEST 有功输出框图

Fig.1 Block diagram of active power output of CBEST

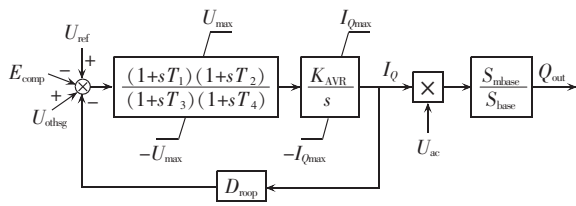


图 2 CBEST 无功输出框图

Fig.2 Block diagram of reactive power output of CBEST

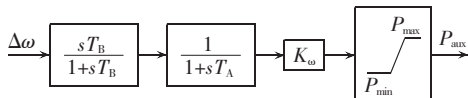


图 3 CBEST 有功功率控制框图

Fig.3 Block diagram of active power control of CBEST

考虑 CBEST 的容量限制,由图 1、图 2 得到电池储能装置的有功和无功输出表达式为:

$$P_{out} = \left(\frac{P_{aux}}{S_{nbase}} + P_{init} \right) \frac{S_{nbase}}{S_{base}} \quad (1)$$

$$Q_{out} = \Delta U \cdot U_{ac} \frac{(1+sT_1)(1+sT_2)}{(1+sT_3)(1+sT_4)} \times \frac{1/D_{roop}}{1+s[1/(K_{AVR}D_{roop})]} \frac{S_{nbase}}{S_{base}} \quad (2)$$

而且有:

$$\begin{cases} -P_{max} \leq P_{out} \leq P_{max} \\ -I_{acmax} \leq I_{ac} \leq I_{acmax} \\ -I_{Qmax} \leq I_Q \leq I_{Qmax} \\ I_{Qmax} = \sqrt{I_{acmax}^2 - (P_{ac}/U_{ac})^2} \end{cases} \quad (3)$$

有功功率控制信号的传递函数为:

$$P_{aux} = \Delta \omega \frac{sT_B}{1+sT_B} \frac{1}{1+sT_A} K_{\omega} \quad (4)$$

其中, P_{aux} 为储能装置的有功输入信号; P_{init} 为储能装置的初始输出功率,一般为 0; P_{out} 、 Q_{out} 为储能装置输出有功、无功功率的标么值; I_{acmax} 为储能装置最大限制电流; S_{base} 为系统基准容量; S_{nbase} 为储能装置基准容量; ΔU 为电压偏差, $\Delta U = U_{ref} - E_{comp} + U_{othsg}$, U_{ref} 为控制母线的电压参考值, E_{comp} 为该母线的电压实际值, U_{othsg} 为稳定器的输出,本文未考虑 PSS 装置对系统的影响,因此 $U_{othsg} = 0$; $T_1 \sim T_4$ 为时间常数; D_{roop} 为

AVR 的调差系数; K_{AVR} 为 AVR 的增益; U_{ac} 为储能变压器低压侧电压; I_Q 为低压侧电流的无功分量; P_{ac} 为储能装置低压侧输出功率; 各物理量的上、下限分别以下标 max 和 min 表示; K_{ω} 为增益系数; T_A 和 T_B 为时间常数; $\Delta \omega = \omega - \omega_0$ 为转子角速度偏差信号, ω_0 为同步角速度。

2 CBEST 最佳安装位置选择的特征向量法

由于系统功率振荡主要受发电机的机械摇摆影响,因此,本文中发电机采用线性化的二阶模型。对于含 n 台发电机的电力系统,在第 i 号发电机的母线加装 CBEST 后,系统的传递函数框图模型如图 4 所示。图中 M_i 为第 i 号发电机的惯性系数, G_{ii} 为 CBEST 的自阻尼力矩系数^[3,16], G_{ij} 为 CBEST 对第 j 号发电机的互阻尼力矩系数, K_1 、 K_2 为系统参数相关的矩阵。

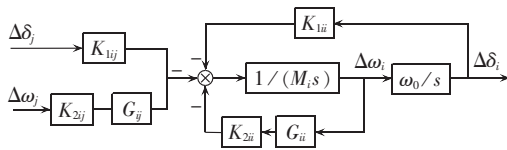


图 4 多机电力系统二阶简化模型

Fig.4 Simplified second-order model of multi-machine power system

对于第 i 号发电机有:

$$\begin{cases} \Delta \dot{\delta}_i = \omega_0 \Delta \omega_i \\ \Delta \dot{\omega}_i = -\sum_{j=1}^n \left(\frac{K_{ij}}{M_i} \Delta \delta_j + \frac{G_{ij} K_{2ij}}{M_i} \Delta \omega_j \right) \end{cases} \quad (5)$$

根据式(5)可写出系统的状态方程:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\omega}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 \\ -M^{-1}K_1 & -M^{-1}K_2G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega' \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, $\Delta \delta = [\Delta \delta_1, \dots, \Delta \delta_n]^T$ 为发电机的功角差; $\Delta \omega = [\Delta \omega_1, \dots, \Delta \omega_n]^T$ 为转子角速度偏差; ω_0 为同步角速度; $M = \text{diag}(M_i)$, $G = \text{diag}(G_{ij})$, $K_1 = [K_{ij}]$, $K_2 = [K_{2ij}]$ ($i, j = 1, 2, \dots, n$)。由文献^[17]可知:

$$\begin{cases} K_{1ij} = \frac{\partial P_{ei}}{\partial \delta_j} \\ K_{2ij} = \frac{\partial P_{ei}}{\partial E'_{qj}} \end{cases} \quad (7)$$

其中, P_{ei} 为第 i 号发电机的电磁功率; E'_{qj} 和 δ_j 分别为第 j 号发电机的暂态电势和转子角偏差,均取稳态运行点的数值。

对式(6)中的状态矩阵,设其特征值为 L_i ($i=1, 2, \dots, 2n$),相应的特征向量为 $u_i = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{i2n}]^T$ 。记 $u_i = [u_{ia}^T, u_{ib}^T]^T$,若不加装 CBEST,则阻尼力矩系数 $G_{ii} = G_{ij} = 0$,于是式(6)的特征值可计算为:

$$\begin{bmatrix} 0 & \omega_0 I \\ -M^{-1}K_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ia} \\ u_{ib} \end{bmatrix} = L_i \begin{bmatrix} u_{ia} \\ u_{ib} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, $\mathbf{I}$ 为单位矩阵。

展开上半部分为:

$$\omega_0 \mathbf{u}_{ib} = \mathbf{L}_i \mathbf{u}_{ia} \tag{9}$$

下半部分为:

$$-\mathbf{M}^{-1} \mathbf{K}_1 \mathbf{u}_{ia} = \mathbf{L}_i \mathbf{u}_{ib} \tag{10}$$

两式联立,可得:

$$-\omega_0 \mathbf{M}^{-1} \mathbf{K}_1 \mathbf{u}_{ia} = \mathbf{L}_i^2 \mathbf{u}_{ia} \tag{11}$$

可见, $\mathbf{L}_i^2$ 为矩阵 $-\omega_0 \mathbf{M}^{-1} \mathbf{K}_1$ 的特征值,对应的特征向量为 $\mathbf{u}_{ia}$ 。通常,将特征向量进行规格化处理,即将 $\mathbf{u}_{ia}$ 中最大者取为 1.0,并将该值对应的角度取为 0° 。

特征向量不仅可以衡量某个模式在不同机组上表现的程度,而且可以表示不同机组功角之间的相位差。若特征向量 $\mathbf{u}_i$ 中第 k 个分量 u_{ik} 的模值最大,则认为系统中第 k 号发电机为功率振荡的主要振源,选第 k 号发电机为 CBEST 的最佳安装位置。

3 PSS/E 自定义方法

3.1 PSS/E 自定义功能介绍

PSS/E 用户自定义模型中,根据动态仿真控制标识符调用元件模型子程序 CONEC 和 CONET。通常采用 7 种标识符实现模型调用,这 7 种标识符分别是 MODE、KPAUSE、MSTATE、MIDTRM、ITER、IFLAG 和 IBDocu。在自定义模型子程序中,通过标识量 MODE 将子程序分为 8 个部分,文献[18-19]详细描述了 MODE 取值 1~8 的功能,限于篇幅,不再赘述。

PSS/E 中元件模型的子程序代码通常使用 FORTRAN 或 FLECS 语言编写,然后再编译/连接生成动态链接库文件 dsusr.dll 以供调用。

书写 PSS/E 用户自定义模型的步骤如下^[19]:

- a. 建立模型的微分方程及传递函数框图;
- b. 确定与模型相关的状态变量,并编写求取其时间导数的程序;
- c. 确定模型的输入、输出量;
- d. 按需分配整数(ICON)、常量(CON)、状态变量(STATE)、代数变量(VAR)数组的地址;
- e. 用 FORTRAN 或 FLECS 语言编写模型的子程序。

3.2 控制系统实现

为了验证基于特征向量法应用于储能装置选址的正确性,对储能装置接入后的电网进行机电暂态仿真。机电暂态过程的时间尺度为秒数量级,在该时间范围内反映电池特性的指标基本保持不变,可以认为电池在机电暂态过程中的充放电特性和参数是线性和时不变的^[10]。因此,可借助线性系统的 PID 控制进行电池储能控制器设计。本文中 CBEST 的有功功率控制的框图模型如图 3 所示。由于在

PSS/E 的通用模型库中没有现成的控制系统模型,因此 CBEST 控制器的模型采用 PSS/E 用户自定义功能实现。

CBEST 控制器自定义模型在动态输入文件(*.dyr)中的数据格式如下:

BUSID ‘USRMDL’ IM ‘model name’ IC IT NI NC NS NV datalist/

其中,BUSID 为模型所连接的母线编号;IM 为发电机 ID;model name 为自定义模型名称;IC 为 CONEC 调用码;IT 为 CONET 调用码;NI 为自定义模型中 ICONs 的数目;NC 为自定义模型中 CONs 的数目;NS 为自定义模型中 STATEs 的数目;NV 为自定义模型中 VARs 的数目;datalist 为 ICONs、CONs 的参数列表。

4 算例仿真

本文采用如图 5 所示的 IEEE 9 节点环形系统对特征向量指标进行验证。该系统有 3 台发电机和 3 个负荷,发电机 G_1 为平衡节点,其余为 PV 节点。发电机采用 6 阶模型,负荷为恒功率模型,系统额定容量为 100 MV·A。

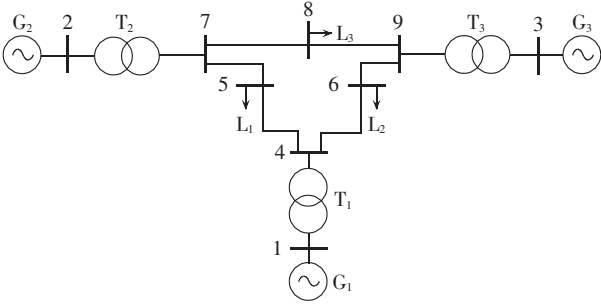


图 5 IEEE 9 节点系统示意图
Fig.5 Schematic diagram of IEEE 9-bus power system

根据式(8)–(11),计算出 IEEE 9 节点系统的特征向量如表 1 所示,表中 u_{ij} 为特征向量 $\mathbf{u}_i$ 的第 j 个分量。由表 1 可以得到该系统的主导极点为 $-0.030\,78 \pm j0.820\,27$,由于该模式下发电机 G_1 对应的特征向量幅值最大,即发电机 G_1 为功率振荡的主要振源,则选母线 1 为 CBEST 的最佳安装位置。在该模式下储能装置最优安装位置排序依次为母线

表 1 IEEE 9 节点系统特征向量计算结果
Table 1 Results of eigenvector calculation for IEEE 9-bus system

模式	频率/Hz	特征根	对应的变量	u_{ij}
1	1.3465	$-0.542\,22 \pm j8.4600$	$\Delta\delta_1$	$0.36061 \angle 179.43^\circ$
			$\Delta\delta_2$	$1.0 \angle 0^\circ$
			$\Delta\delta_3$	$0.58948 \angle 0.374^\circ$
2	0.13055	$-0.030\,78 \pm j0.820\,27$	$\Delta\delta_1$	$1.0 \angle 0^\circ$
			$\Delta\delta_2$	$0.99040 \angle -0.313^\circ$
			$\Delta\delta_3$	$0.98842 \angle -0.258^\circ$

1、母线 2、母线 3。

在时域仿真中通过设置不同类型故障验证特征向量指标的有效性。图 6 为三相接地短路故障分别发生于母线 1、母线 2、母线 3、母线 5、母线 6，储能接至不同发电机端时，发电机 G_1 输出有功功率(标

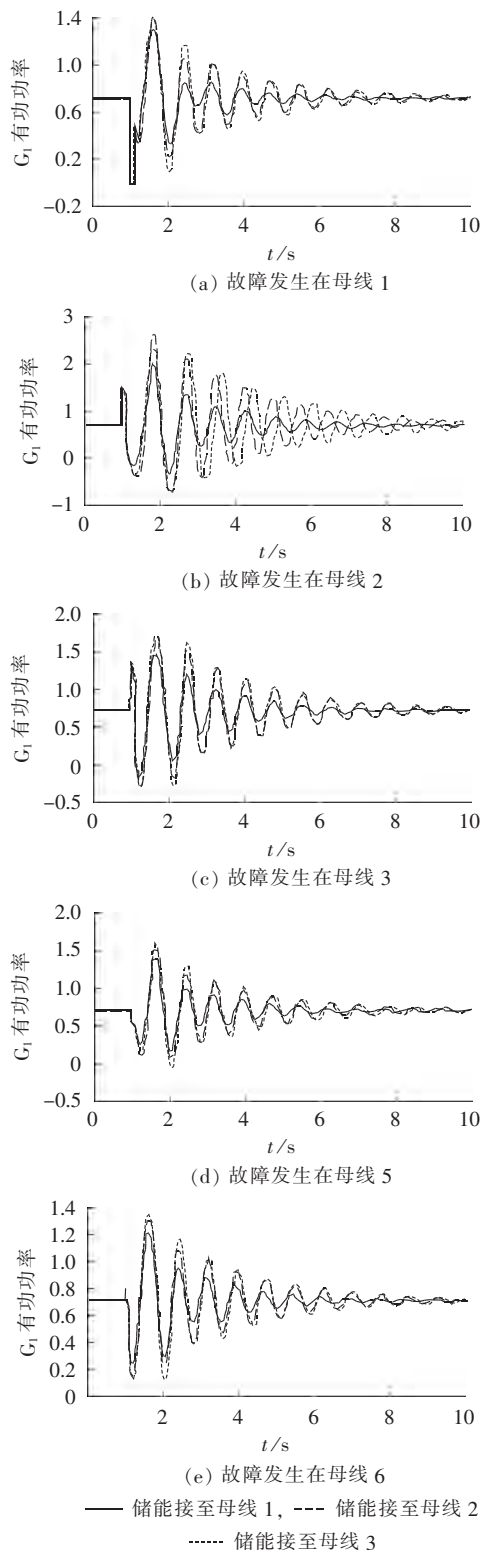


图 6 三相短路发生在不同位置时 G_1 有功变化
Fig.6 Active power variation of G_1 with three-phase short circuit fault at different positions

么值)变化情况,其他 2 台发电机暂态过程与 G_1 的仿真结果一致,限于篇幅其仿真曲线在本文中不再给出。为了进一步验证本文方法的有效性,在系统的 3 个负荷上分别设置 $\pm 50\%$ 的负荷扰动,即在 $t=1\text{ s}$ 时,负荷先增大到原来的 150%,然后在 $t=1.01\text{ s}$ 时减小到原来的 50%,最后在 $t=1.02\text{ s}$ 恢复到原来的大小。当 CBEST 接至不同位置时,发电机 G_1 的有功功率输出波动情况如图 7 所示。

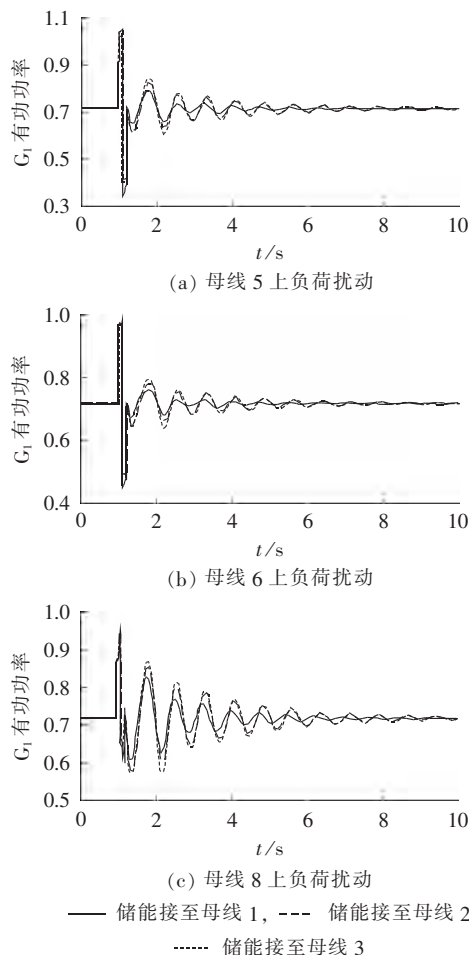


图 7 负荷扰动时 G_1 有功功率变化
Fig.7 Active power variation of G_1 with load disturbance

从图 6 可以看出,无论三相短路故障发生在系统的什么位置,储能装置接在母线 1 上时对系统的功率振荡抑制效果最好,接在母线 2 上次之,接在母线 3 上最差。但接至母线 2 与母线 3 上的作用效果差别不大。仿真结果表明储能系统接至母线 1 时,系统的暂态过渡过程最短。

由图 6 和图 7 的仿真结果可以看出,在不同故障位置和故障类型下,储能最佳接入位置的选取具有一致性,即母线 1 为 CBEST 最佳装设位置,这与特征向量指标的分析结果相一致,说明 IEEE 9 节点系统在上述 2 种工况下采用特征向量指标衡量储能装置最佳装设地点具有较高的准确性。

5 结论

本文建立了 CBEST 的数学模型,在 PSS/E 中自定义了储能控制器的数学模型,采用以转子角速度偏差为输入信号的 PID 控制,得出结论如下:

a. 基于特征向量法的基本原理,研究了其用于储能选址的可行性,通过 PSS/E 小信号分析法对 IEEE 9 节点系统进行特征值分析,计算了特征根对应的特征向量模值;

b. 采用时域仿真分析了在不同运行工况下储能最佳装设位置,仿真结果表明采用特征向量指标选出的储能装设位置具有一定的准确性。

本文采用的方法和结论对于大规模电力系统中储能的优化布局具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] KUNDUR P. 电力系统稳定与控制[M]. 本书翻译组,译. 北京:中国电力出版社,2002:471-485.
- [2] MARTINS N,LIMA L T. Determination of suitable locations for power system stabilizers and static var compensators for damping electromechanical oscillations in large scale power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems,1990,5(4):1455-1469.
- [3] DEMELLO F P,NOLAN P J,LASKOWSKI T F,et al. Coordinated application of stabilizers in multi-machine power systems[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems,1980,PAS-99(2):892-901.
- [4] LIN Zifeng,MIN Yong. Selecting the location and the capacity of SMES for on-line steady state security assessment of power systems[C]//The 2nd International Conference on Electric Utility Deregulation,Restructuring and Power Technologies. Hong Kong, China:[s.n.],2004:606-610.
- [5] OHSAWA Y,MARUOKA Y,TAKENO H,et al. Determination of installation location of SMES for power system stabilization[C]//Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Geneva,Switzerland:[s.n.],2000:233-236.
- [6] LEE S. Location of a superconducting device in a power grid for system loss minimization using loss sensitivity[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity,2007,17(2):2351-2354.
- [7] UEDA S,TAKEUCHI H,OHSAWA Y,et al. Studies on power system stabilization by distributed allocation of micro SMES units[C]//IEEE International Conference on Power System Technology. Kunming,China:[s.n.],2002:1244-1248.
- [8] LI Y Z,WADA K,OHSAWA Y,et al. Optimal allocation of micro SMES units for power system stabilization by means of genetic algorithm[C]//IEEE International Conference on Power System Technology. Chongqing,China:[s.n.],2006:1-6.
- [9] 刘前进,黎雄,孙元章. 基于 PSASP 程序的 FACTS 潮流建模[J]. 电网技术,2000,24(7):6-9.
LIU Qianjin,LI Xiong,SUN Yuanzhang. Power flow modeling of facts based on PSASP[J]. Power System Technology,2000,24(7):6-9.
- [10] 李蓓. 用于电力系统的全钒氧化还原液流电池的特性分析、建模和仿真研究[D]. 北京:中国电力科学研究院,2010.
LI Bei. Characteristic analysis,modeling and simulation study on all vanadium redox flow battery used in power system[D]. Beijing:China Electric Power Research Institute,2010.
- [11] 李妍,荆盼盼,王丽,等. 通用储能系统数学模型及其 PSASP 建模研究[J]. 电网技术,2012,36(1):51-57.
LI Yan,JING Panpan,WANG Li,et al. A mathematical model of versatile energy storage system and its modeling by power system analysis software package[J]. Power System Technology,2012,36(1):51-57.
- [12] 徐琳. 微电网蓄电池储能系统控制技术研究[D]. 济南:山东大学,2012.
XU Lin. Study on control strategies of battery energy storage system in microgrid[D]. Ji'nan:Shandong University,2012.
- [13] 姚涛. 超导磁储能装置控制策略研究[D]. 武汉:华中科技大学,2006.
YAO Tao. Study on the control of superconducting magnetic energy storage[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2006.
- [14] 王宝华,杨成梧. FACTS 稳定控制策略综述[J]. 电力自动化设备,2000,20(2):50-53.
WANG Baohua,YANG Chengwu. A summary of stability control in FACTS[J]. Electric Power Automation Equipment,2000,20(2):50-53.
- [15] 李海峰,李乃湖. FACTS 装置用于电力系统稳定控制的综述[J]. 电力系统自动化,1998,22(9):31-37.
LI Haifeng,LI Naihu. Overview of power system stability control using facts devices[J]. Automation of Electric Power Systems,1998,22(9):31-37.
- [16] 王海风,冯纯伯. 多机电力系统中 PSS 最佳安装地点的选择——对特征向量分析法的研究[J]. 中国电机工程学报,1989,9(3):67-72.
WANG Haifeng,FENG Chunbo. Selection for allocations of PSS in multi-machine power systems—study of eigenvector method[J]. Proceedings of the CSEE,1989,9(3):67-72.
- [17] 刘取. 电力系统稳定性及发电机励磁控制[M]. 北京:中国电力出版社,2007:128-131.
- [18] 陈义宣. 基于组合优化的低频减载方案的整定[D]. 成都:西南交通大学,2009.
CHEN Yixuan. Design of under-frequency load shedding schemes using combinatorial optimization[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2009.
- [19] 马宁宁. 基于分布式流体网络的电力系统机电扰动传播研究[D]. 成都:西南交通大学,2013.
MA Ningning. Study on electromechanical disturbance propagation in power systems based on distributed fluid network[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2013.

作者简介:



杜冰心

杜冰心(1986—),女,湖北襄阳人,硕士,主要从事储能、电力系统稳定与控制方面的研究工作(E-mail:bingxin8631@163.com);

王德林(1970—),男,河南安阳人,副教授,博士,主要从事电力系统机电动态、扰动传播、风力发电方面的研究工作(E-mail:dlwang@swjtu.cn)。

(下转第 89 页 continued on page 89)

[11] JEONG S J,KIM B W,SONG S H. Improvement of predictive current control performance using on-line parameter estimation in phase controlled rectifier[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2007,22(5):1820-1825.

[12] HOSSEIN M K,IDRIS A G,LIUCHEN C,et al. A novel DSP-based current-controlled PWM strategy for single phase grid connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006,21(4):985-993.

[13] BODE G H,LOH P C,NEWMAN M J,et al. An improved robust predictive current regulation algorithm[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2005,41(6):1720-1733.

[14] HOLTZ J. Pulse width modulation-asurvey[J]. IEEE Transactions on Industry Electronics,1992,39(5):410-420.

[15] CORTES P,RODRIGUEZ J,QUEVEDO D E,et al. Predictive current control strategy with imposed load current spectrum[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2008,23(2):612-618.

作者简介:



杨兴武(1981—),男,河南邓州人,副教授,博士,主要研究方向为有源电力滤波、无功补偿及新能源并网技术(E-mail:yxw790930@sohu.com);

冀红超(1991—),男,河南邓州人,硕士研究生,主要研究方向为新能源发电与并网技术。

杨兴武

Switching loss optimization based on model predictive control for grid-connected inverter

YANG Xingwu,JI Hongchao,GAN Wei

(College of Electrical Power Engineering,Shanghai University of Electric Power,Shanghai 200090,China)

Abstract: A method based on the model predictive control is proposed to decrease the switching loss of single-phase grid-connected inverter. It detects the current direction based on the discrete state model of the inverter to select the switching state preliminarily and to block the states of some devices,takes the tracking current difference as the index function and substitutes the selected switching state into the index function to search the optimal switching state resulting in the minimum index function. A loss reduction function is then introduced to evaluate the current control error,if the error does not exceed the limit,the switching state output remains,otherwise changes the switching state output according to the present minimum of index function to significantly reduce the system switching frequency. The proposed control method is simple in principle and easy to implement the digital control. Compared with traditional control methods,the system is more robust and no PI parameters are needed. Simulative results show that,the controller tracks the grid-connection current well and the switching frequency is greatly reduced.

Key words: model predictive control; switching state; tracking control; switching frequency; optimization; electric inverters

(上接第 83 页 continued from page 83)

Optimal installation location selection based on eigenvector analysis for battery energy storage device

DU Bingxin,WANG Delin

(School of Electrical Engineering,Southwest Jiaotong University,Chengdu 610031,China)

Abstract: A mathematic model of CBEST(Cell and Battery Energy STorage) is built to analyze the effect of its installation location on the results of power compensation for selecting its optimal installation location. The user-defined module of PSS/E is applied to establish a model of CBEST control system. The small signal analysis method is adopted to analyze the feasibility of applying the eigenvector method to the optimal installation location selection of energy storage device and the calculation process of eigenvector modulus is given. The correctness and effectiveness of eigenvector indicators used in the optimal installation location selection of energy storage device are verified by the simulative results of IEEE 9-bus system.

Key words: electric batteries; energy storage; optimal position; eigenvector method; PSS/E user-defined module