

独立电压调节回路的最优分散协调励磁控制

郝正航, 陈 卓, 邱国跃, 许克明

(贵州大学 电气工程学院, 贵州 贵阳 550003)

摘要: 提出一种新的励磁控制方法, 解决了传统多机系统分散协调励磁控制中电压反馈增益偏低而达不到要求的问题。该方法将电压反馈作为独立的调节回路, 无须依赖加权系数的二次优化, 按调压要求独立设计电压反馈增益。将其余的多个输出量(转速、功率等)作为附加控制信号形成外环控制回路, 利用分散协调控制思想, 通过求解 Levine-Athans 方程组, 实现对多个附加信号增益优化, 从而保证全局稳定和性能最优。既根据稳态调节精度的要求设定电压反馈系数, 又实现了多变量协调优化控制。最后, 以电力科学研究院 EPRI-36 系统为实例, 分别用所提方法和传统方法设计 2 种励磁调节器, 在小干扰稳定性、暂态稳定性、电压调节精度等方面进行对比, 结果显示所提方法的综合性能具有优越性。

关键词: 电力系统; 励磁控制; 动态稳定; 电压调节; 协调控制

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)07-0006-04

0 引言

电力系统稳定控制一直是一个棘手的难题。多机系统的各控制回路之间存在耦合作用和交互影响, 基于局部模型的控制设计易出现相互冲突, 造成控制性能不理想, 甚至不能全局稳定。为了解决这一问题, 分散协调控制思想受到高度重视^[1-6]。文献[7]系统地研究了多机系统下的最优分散协调励磁控制(以下简称 LOEC), 其工作具有开创性, 但是, 至今仍然存在一些不足, 其中一个关键缺陷是, 与自动电压调节器和电力系统稳定器(AVR+PSS)结构的励磁控制器相比, LOEC 往往缺少足够高的电压反馈增益^[8]。文献[9]更加明确的指出: LOEC 把电压调节约束的控制问题变为无约束的控制问题, 在实际系统中是行不通的。文献[10]指出: 在附加励磁控制下, 机电阻尼和端电压调节性能存在矛盾, 过分追求阻尼指标, 可能导致电压控制能力降低。

本文提出一种面向多机系统, 可满足机端电压反馈增益任意约束的最优分散励磁控制方法。该方法不依靠调整加权系数提高电压反馈增益, 解决了难以选取权矩阵的问题, 且可根据稳态调节精度的要求任意设定电压反馈增益, 控制器性能指标仍可达到甚至超过传统无约束的最优分散协调控制方法。

因此, 在设计励磁规律时, 必须重视电压调节性能。虽然文献[7]提出可以通过优化矩阵提高电压反馈增益, 但其迭代方法给本来很大的设计计算量又增加了 5~10 倍的设计计算量, 尽管如此只能将电压反馈增益限制在一个大致的范围之内。

1 LOEC 控制结构

高精度地调节发电机端电压是励磁控制的基本任务之一, 但是近年来的励磁控制研究存在共同弱点, 即仅强调以提高功角稳定为目标, 励磁控制器没有独立电压调节回路, 有的文献甚至根本不反馈电压, 彻底取消电压调节回路。这种做法遭到了很多学者的反对, 特别是工程界认为不重视电压调节的任何励磁控制规律都是不能投入实际系统的。

文献[7]提出的最优分散协调励磁控制器结构如图 1(a)所示。它是将本地多个输出量, 如功率、转速、功角、端电压、励磁电压等的全部或部分, 按最优反馈系数叠加在一起形成控制量。它的不足在于, 虽然反馈了端电压, 但电压反馈增益将在 Levine-Athans 方程组中求出, 其具体数值难以预料, 所以, 这种控制方案是没有独立电压反馈回路的。

本文提出的有独立电压调节回路的最优分散协调励磁控制器如图 1(b)所示。它的特点是: 将电压调节回路独立出来, 即保留原有 AVR 结构, AVR 放大倍数按稳态调节精度可任意设定。其余反馈量看作附加控制(或外环控制), 显然这种控制结构类似于 AVR+PSS, 故可以说成是 AVR+LOEC。这样, 既借鉴了工程上偏爱的 AVR+PSS 结构, 又继承了 LOEC 可以反馈更多变量的优势。

2 最优分散协调控制问题描述

无独立电压调节回路的最优分散协调控制的建模过程在文献[7]中已详细论述。本文在文献[7]基础上通过对系统模型的改造, 可以得到具有独立电压回路的系统模型。

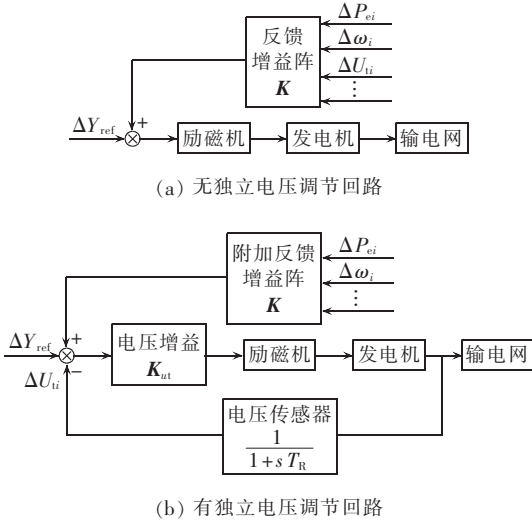


图 1 励磁控制系统框图

Fig.1 Structure of excitation control system

根据多机电力系统的转子运动方程、简化 Park 方程、励磁机动态方程等微分方程组和反映网络变量约束的代数方程组,在典型运行点线性化后,可得到 N 机系统状态空间模型(推导过程略):

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} \quad (1)$$

$$\mathbf{Y}_{ut} = \mathbf{C}\mathbf{X} \quad (2)$$

$$\mathbf{X} = [\Delta\delta_1, \Delta\omega_1, \Delta E'_{q1}, \Delta E_{fd1}, \dots,$$

$$\Delta\delta_N, \Delta\omega_N, \Delta E'_{qN}, \Delta E_{fdN}]^T$$

$$\mathbf{Y}_{ut} = [\Delta U_{t1}, \Delta U_{t2}, \dots, \Delta U_{tN}]$$

$$\mathbf{U} = [\Delta U_{e1}, \Delta U_{e2}, \dots, \Delta U_{eN}]^T$$

$\mathbf{X}$ 为开环系统状态向量, $\mathbf{Y}_{ut}$ 为端电压输出向量, $\mathbf{U}$ 为励磁控制向量, $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$ 分别为系统矩阵、控制矩阵和输出矩阵,式中其余电力系统惯用符号的名称和意义不再赘述。

设电压反馈增益阵为 $\mathbf{K}_{ut}$,着重说明 $\mathbf{K}_{ut}$ 的各元素对应各发电机 AVR 的电压放大倍数,它们并不通过优化计算得到,而是根据稳态运行对电压调节精度的要求事先设定。

设投入 AVR 后的系统状态空间模型为

$$\dot{\mathbf{X}}_1 = \mathbf{A}_1\mathbf{X}_1 + \mathbf{B}_1\mathbf{U}_1 \quad (3)$$

$$\mathbf{Y}_1 = \mathbf{C}_1\mathbf{X}_1 \quad (4)$$

$$\mathbf{X}_1 = [\Delta\delta_1, \Delta\omega_1, \Delta E'_{q1}, \Delta E_{fd1}, \dots,$$

$$\Delta\delta_N, \Delta\omega_N, \Delta E'_{qN}, \Delta E_{fdN}]^T$$

$$\mathbf{Y}_1 = [\Delta\delta_1, \Delta\omega_1, \Delta E_{fd1}, \Delta P_{e1}, \Delta I_{t1}, \dots,$$

$$\Delta\delta_N, \Delta\omega_N, \Delta E_{fdN}, \Delta P_{eN}, \Delta I_{tN}]^T$$

$$\mathbf{U}_1 = [\Delta U_{e1}, \Delta U_{e2}, \dots, \Delta U_{eN}]^T$$

$\mathbf{X}_1$ 为 AVR 投入后的闭环系统状态向量, $\mathbf{Y}_1$ 为拟附加反馈的输出向量, $\mathbf{U}_1$ 为附加励磁控制向量, $\mathbf{A}_1$ 为 AVR 投入时闭环系统状态矩阵,根据线性系统理论:

$$\mathbf{A}_1 = \mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{K}_{ut}\mathbf{C}$$

$\mathbf{B}_1 = \mathbf{B}$, 为控制矩阵; $\mathbf{C}_1$ 是与 $\mathbf{Y}_1$ 对应的输出矩阵。

具有独立电压调节回路的多机系统最优分散协

调励磁控制所要解决的问题可以描述为:在式(3)(4)以及以下分散控制结构的约束下,

$$\mathbf{U}_1 = \mathbf{K}_d \mathbf{Y}_1 \quad (5)$$

求分块对角反馈增益阵

$$\mathbf{K}_d = \begin{bmatrix} K_{d1} & & & \\ & K_{d2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & K_{dN} \end{bmatrix}$$

使全系统性能指标 $J = \int_0^\infty (\mathbf{X}_1^T \mathbf{Q} \mathbf{X}_1 + \mathbf{U}_1^T \mathbf{R} \mathbf{U}_1) dt$ 为极小。

根据问题的性质, $\mathbf{K}_d$ 是 Levine-Athans 方程组的解。即

$$\mathbf{R}\mathbf{K}_d(\mathbf{C}_1\mathbf{V}\mathbf{C}_1^T)_d + (\mathbf{B}_1^T\mathbf{P}\mathbf{V}\mathbf{C}_1^T)_d = 0 \quad (6)$$

$$\mathbf{P}(\mathbf{A}_1 + \mathbf{B}_1\mathbf{K}_d\mathbf{C}_1) + (\mathbf{A}_1 + \mathbf{B}_1\mathbf{K}_d\mathbf{C}_1)^T\mathbf{P} +$$

$$\mathbf{Q} + \mathbf{C}_1^T\mathbf{K}_d^T\mathbf{R}\mathbf{K}_d\mathbf{C}_1 = 0 \quad (7)$$

$$(\mathbf{A}_1 + \mathbf{B}_1\mathbf{K}_d\mathbf{C}_1)\mathbf{V} + \mathbf{V}(\mathbf{A}_1 + \mathbf{B}_1\mathbf{K}_d\mathbf{C}_1)^T + \mathbf{I} = 0 \quad (8)$$

$\mathbf{Q}$ 、 $\mathbf{R}$ 为加权矩阵, $\mathbf{P}$ 、 $\mathbf{V}$ 、 $\mathbf{K}_d$ 为未知矩阵, $\mathbf{I}$ 为单位阵。 $\mathbf{K}_d$ 解出后,式(5)就是励磁规律。

3 算例分析

为了对比研究,以电力科学研究院 EPRI-36 系统为对象(系统参数见文献[11]),分别设计无独立电压回路和有独立电压回路的最优分散励磁规律。

3.1 励磁规律求取

为了比较 2 种励磁规律,首先采用文献[7]方法设计传统的无独立电压调节回路的最优分散协调励磁控制规律,求得的反馈增益阵中对应系数见表 1;然后,采用本文方法设计有独立电压回路的最优分散协调励磁控制规律,反馈增益阵中对应系数见表 2;

表 1 无电压回路最优反馈系数

Tab.1 Optimum feedback coefficients without voltage loop

发电机	K_ω	K_{Pe}	K_{ut}
G ₁ (汽)	5.5920	-4.3368	-69.052
G ₂ (汽)	-0.8678	-14.4700	-122.220
G ₃ (水)	4.4892	-4.3964	-80.162
G ₄ (汽)	1.3933	-20.9840	-134.050
G ₅ (汽)	4.3004	-12.8390	-90.275
G ₆ (汽)	-8.2701	-124.8600	-339.180
G ₇ (水)	2.7760	-23.5690	-97.171
G ₈ (水)	3.5300	-16.7520	-122.650

表 2 有电压回路最优反馈系数

Tab.2 Optimum feedback coefficients with voltage loop

发电机	K_ω	K_{Pe}	K_{ut}
G ₁ (汽)	9.6429	-0.0106	-250
G ₂ (汽)	0.4717	-12.8180	-250
G ₃ (水)	6.3798	-2.3510	-150
G ₄ (汽)	3.1248	-17.9590	-250
G ₅ (汽)	8.4859	-5.9321	-250
G ₆ (汽)	-8.9387	-133.5300	-250
G ₇ (水)	4.2992	-22.4370	-150
G ₈ (水)	4.0225	-14.8600	-150

表中, K_{ω} 、 K_{Pe} 、 K_{ut} 分别表示每台发电机转速、有功功率和端电压反馈增益。

在传统设计方法中,端电压增益 K_{ut} 和其他反馈增益同等对待,都是通过求解 Levine-Athans 方程组得到,所得到的 K_{ut} 能否满足稳态精度要求无法预计。根据国家标准,汽轮发电机应满足 $|K_{ut}| > 200$,水轮发电机应满足 $|K_{ut}| > 100$ 。从表 1 看出,除 G_6 之外,所有发电机的 $|K_{ut}|$ 都偏低,不满足要求。

考虑独立端电压约束后, K_{ut} 并不作为 Levine-Athans 方程组的求解变量,而是根据稳态精度或自然调差系数的要求事先设定。因此,本文将所有汽轮发电机设定 $|K_{ut}| = 250$,水轮发电机设定 $|K_{ut}| = 150$ 。将其余反馈量(如 K_{Pe} 、 K_{ω})仍然通过 Levine-Athans 方程组求解得到(见表 2)。这样,既保证了电压回路的独立性,又实现了多变量反馈的优化目的。事实上,这种处理方法是将励磁控制视为双闭环控制,电压控制为内环,其余反馈为外环。

3.2 稳定控制效果比较

本文方法与传统方法相比,只对附加控制量优化,而 K_{ut} 没有参加优化。这样的优化结果是否造成稳定控制效果变差,下面从小干扰稳定性和大干扰下的暂态稳定极限进行比较。

分别按表 1 和表 2 给出的反馈系数,利用电力系统分析综合程序(PSASP 6.2)的用户自定义功能,建立 2 种励磁控制模型,进行比较研究。分别投入 2 种励磁控制器,系统的小干扰计算结果见表 3。表 3 显示:2 种励磁规律下,主导机电模式阻尼比分别为 8.96 % 和 8.93 %,两者的其余模式阻尼比均在 10 % 以上。可见,两者小干扰稳定性基本相当。

表 3 2 种励磁规律下的特征分析比较

Tab.3 Comparison of eigenvalue analysis

无独立电压回路		有独立电压回路	
机电模式	阻尼 / %	机电模式	阻尼 / %
-0.8163±j4.017	19.90	-0.5405±j4.624	11.60
-1.2146±j13.50	8.96	-1.2100±j13.50	8.93
-1.3890±j3.818	34.20	-1.1852±j5.406	21.40
-1.5811±j3.996	36.80	-1.3762±j5.726	23.40
-1.8937±j3.563	46.90	-1.5706±j5.935	25.60
-2.0018±j4.780	38.60	-1.5729±j5.238	28.80
-1.8601±j4.015	42.00	-2.0086±j4.288	42.40

在 2 种励磁控制器分别投入后,进行大干扰下仿真试验。在系统的 4 个典型位置设置三相短路故障,比较两者的极限切除时间,结果见表 4。可见:有独立电压调节回路的励磁控制器使系统具有更长的故障极限切除时间,即有更好的暂态稳定极限。

所以,从提高系统稳定性考虑,本文方法可以达到甚至超过传统方法的控制效果。

3.3 稳态调节精度比较

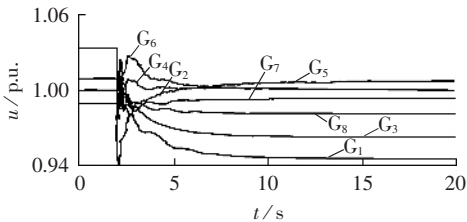
本文提出保留电压调节回路独立性,主要目的是强调高精度的调节机端电压,这是系统正常运行的客观要求。为检验稳态性能,分别投入 2 种励磁规律,

表 4 大扰动下暂态稳定极限比较

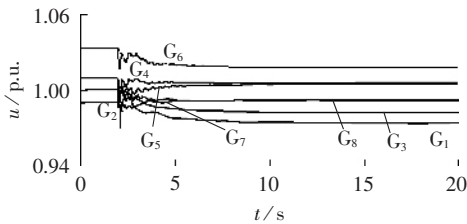
Tab.4 Comparison of transient stability limit under large disturbances

故障地点	极限切除时间 / s	
	无独立电压回路	有独立电压回路
B ₂₄ -B ₉ (中部)	0.995	1.050
B ₁₈ -B ₁₆ (中部)	0.396	0.402
B ₃₀ -B ₁₉ (首端)	0.478	0.478
B ₁₁ -B ₂₅ (首端)	0.306	0.311

负荷节点 bus 16 从 $t = 2$ s 时开始,有功功率和无功功率分别增加 200 MW 和 150 Mvar。机端电压调节过程见图 2。图中曲线 $G_1 \sim G_8$ 为机端电压响应曲线。



(a) 无独立电压回路



(b) 有独立电压回路

图 2 负荷扰动下的机端电压响应曲线

Fig.2 Response curve of generator terminal voltage under load disturbance

从图 2 可看出:由于负荷功率的突然变化,机端电压经过一个暂态过程后进入新的稳态。新稳态端电压并没有恢复至初始值,存在一定稳态误差。从图 2(a)和图 2(b)比较得出:有独立电压调节回路时,由于具有较大的电压反馈增益,其稳态误差显著小于无独立电压调节回路的情况。

4 结语

励磁控制规律不能仅从功角稳定性要求进行设计,还应重视电压调节性能。否则,其基本调压功能可能较差,甚至丧失。本文在传统的最优分散协调励磁控制基础上,设计了具有独立电压调节回路的最优分散协调励磁控制策略。其稳定控制效果可达到传统方法的水平,而稳态调节精度则显著优于传统方法,而且由于电压调节回路的独立性,稳态性能指标可根据运行要求任意设定,这是传统方法不能办到的。

参考文献:

[1] 李兴源,邵震霞,汤广福. 多馈入高压直流输电系统的分散协调控制研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(16):7-12.
LI Xing-yuan,SHAO Zhen-xia,TANG Guang-fu. Study on decentralized coordinated control for multi-infeed HVDC transmission

- system[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 7-12.
- [2] 颜泉, 李兴源, 刘红超. 多馈入交直流系统关联测量分散协调控制[J]. 电工技术学报, 2004, 19(12): 42-46.
- YAN Quan, LI Xing-yuan, LIU Hong-chao. Decentralized coordinated control for multi-infeed HVDC based on correlative measured vectors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(12): 42-46.
- [3] 马燕峰, 赵书强, 魏清. 基于遗传算法的交直流电力系统稳定器和附加控制器的协调[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(5): 75-78.
- MA Yan-feng, ZHAO Shu-qiang, WEI Qing. Coordination between power system stabilizer and additional controller based on genetic algorithms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(5): 75-78.
- [4] ABIDO M A. Parameter optimization of multimachine power system stabilizers using genetic local search [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2001, 23(8): 785-794.
- [5] CAI Li-Jun, ERLICH I. Simultaneous coordinated tuning of PSS and FACTS damping controllers in large power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(1): 294-300.
- [6] 谢小荣, 肖晋宇, 童陆园, 等. 采用广域测量信号的互联电网区间阻尼控制[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(2): 37-40.
- XIE Xiao-rong, XIAO Jin-yu, TONG Lu-yuan, et al. Inter-area damping control of interconnected power systems using wide-area measurements [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(2): 37-40.
- [7] 韩英铎, 王仲鸿, 陈准金. 电力系统最优分散协调控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [8] 韩英铎, 谢小荣, 崔文进. 同步发电机励磁控制研究的现状和走向[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2001, 41(4/5): 142-146.
- HAN Ying-duo, XIE Xiao-rong, CUI Wen-jin. Status quo and future trend in research on synchronous generator excitation control[J]. Journal of Tsinghua University: Sci & Tech, 2001, 41(4/5): 142-146.
- [9] 刘增煌, 方思立. 电力系统稳定器对电力系统动态稳定的作用及与其他控制方式的比较[J]. 电网技术, 1998, 22(3): 4-10.
- LIU Zeng-huang, FANG Si-li. The effect of power system stabilizer(PSS) on power system dynamic stability and comparison with other control method[J]. Power System Technology, 1998, 22(3): 4-10.
- [10] 赵书强, 常鲜戎, 贺仁睦, 等. PSS控制过程中的借阻尼现象与负阻尼效应[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 7-11.
- ZHAO Shu-qiang, CHANG Xian-rong, HE Ren-mu, et al. Borrow damping phenomena and negative damping effect of PSS control[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 7-11.
- [11] 电力科学研究院计算所. 电力系统分析综合程序 6.2 版[M]. 北京: 电力科学研究院, 2001.
- [12] 段建民, 张焰, 范习辉, 等. 基于 PSS/E 的电力系统电压稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(6): 34-37, 65.
- DUAN Jian-min, ZHANG Yan, FAN Xi-hui, et al. Power system voltage stability analysis based on PSS/E [J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(6): 34-37, 65.
- [13] TAYLOR C W. 电力系统电压稳定[M]. 王伟胜, 译. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [14] KUNDUR P. 电力系统稳定与控制[M]. 周孝信, 宋永华, 李兴源, 等, 译. 北京: 中国电力出版社, 2002.

(责任编辑: 汪仅珍)

作者简介:

郝正航(1972-), 男, 河南开封人, 副教授, 研究方向为动态电力系统分析与控制(E-mail: haozhenghang@163.com);

陈卓(1980-), 女, 贵州安顺人, 硕士, 研究方向为复杂系统分析与控制、电子信息;

邱国跃(1959-), 男, 贵州贵阳人, 系主任, 副教授, 研究方向为电力系统运行与控制、人工智能等;

许克明(1937-), 男, 贵州贵阳人, 教授, 研究方向为电力系统运行与控制、人工智能、配网自动化等。

Optimal decentralized coordinated control with independent voltage regulation loop

HAO Zheng-hang, CHEN Zhuo, QIU Guo-yue, XU Ke-ming

(Department of Electrical Engineering, Guizhou University,

Guiyang 550003, China)

Abstract: A new approach to excitation control is presented aiming at the low voltage feedback gain of the decentralized coordinated excitation control in the multi-machine system. It takes the voltage feedback link as a separate regulation loop and its voltage feedback gain can be designed to be independent to the secondary optimization of the weight parameter. The outer control loop is constituted of other outputs such as rotate speed, power, and so on. Based on the theory of decentralized coordinated control, gains of these outputs are optimized by solving Levine-Athans equations to ensure the global stability and the performance optimum. It sets the voltage feedback parameter directly according to the regulation precision for steady state while realizes the multi-variable coordinated optimization control. Two excitation regulators are designed by using the introduced method and the traditional method for the EPRI-36 system. Results show that the former has better compositive performance in small disturbance stability, transient stability and voltage regulation precision.

Key words: power system; excitation control; dynamic stability; voltage regulation; coordinated control