

先进的高压侧电压控制改善电压稳定性

赵兴勇,张秀彬

(上海交通大学 电气工程系,上海 200240)

摘要: 基于常规的发电机励磁系统控制方法,通过引入补偿控制的方式,提出了一种改进的先进的高压侧电压控制(AHSVC)方法,并论述了其工作原理、实现方式及特性。现有的 AHSVC 方法没有计及发电机有功电流的影响,而改进方法根据严格的理论推导,在机端电压的计算中同时计及由发电机无功电流和有功电流引起的压降,并引入下降率电抗,以平衡并列运行发电机之间的电流和无功功率,通过机端电压设定值准确控制高压侧电压的目标设定值。通过数值仿真结果分析,证明了该改进方法的有效性和实用性。由于不需要任何高压侧反馈信号,所以易于实现且经济。

关键词: 电力系统电压稳定;励磁系统;自动电压调节器;先进的高压侧电压控制;补偿控制

中图分类号: TM 761⁺.11

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)10-0043-04

0 引言

随着电力市场化及现有输电系统的重载运行,电压稳定问题变得越来越严重^[1]。电压稳定与发电系统、输电系统及负荷系统有着密切的关系,其中输电系统的性质是影响电压稳定的关键因素之一^[2]。电压稳定性可以通过对输电电压进行严格的控制得以改善。根据有功功率、无功功率及电压之间的关系可知^[3],无功功率的传输与电压的幅值有关,且总是由高压端流向低压端,而由输电线路并联电容输出的无功功率与电压的平方成正比。为了维持输电系统较高的电压水平和良好的电压分布,实际电力系统主要采取了 2 类措施进行调控。一类是进行各种形式的无功补偿,如同步调相机、并联电容器、静止无功补偿器等^[4]。另一类是充分发挥发电机的电压、无功调节作用,如在发电机励磁控制中,采用快速、高顶值和强行励磁等改善暂态稳定性;采用线路补偿

器(LDC)补偿变压器和线路的电压降^[5];采用具有主变高压侧电压为反馈信号的电力系统电压调节器(PSVR)实现对高压侧电压的控制^[6]。近年来提出并得以应用的高压侧电压控制有多种实现方式^[7-8],如 PSVR 和从不从升压变压器高压侧取反馈信号的先进的高压侧电压控制 AHSVC(Advanced High Side Voltage Control)^[9]。AHSVC 在改善电压稳定性方面有着良好的作用,实现简单且易于应用。

现提出一种改进的 AHSVC。AHSVC 的特点是不需要任何高压侧反馈信号(即不需要测量升压变压器高压侧电压),仅需提供给常规自动电压调节器(AVR)的信号,即来自升压变压器低压侧电流互感器的电流和来自电压互感器的电压信号,便可控制升压变压器的高压侧电压为设定值^[10-11]。AHSVC 的基本思路是:在传统的励磁系统中引入对无功电流的补偿,控制高压侧电压为恒定。与传统励磁控制相比,AHSVC 可分散应用,响应速度较快,本质上有较高的可靠性和有效性,可明显改善系统的电压稳定性,但在理论上不够严谨。基于该方法,对一种既考虑无功

收稿日期:2006-12-19;修回日期:2007-04-03

电流,又计及有功电流的改进 AHSVC 进行了研究,其在理论上更为严谨。仿真结果表明,该方法能进一步提高被估算电压的准确性,明显改善电压稳定性。

1 改进 AHSVC 的配置

改进 AHSVC 是在传统 AVR 的基础上引入补偿控制形成的,其配置^[12]如图 1 所示。

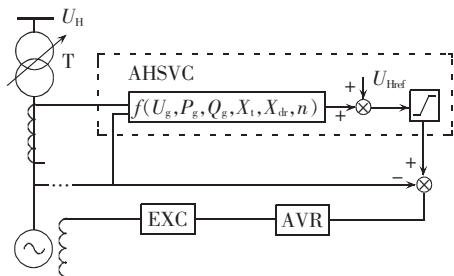


图 1 改进的 AHSVC 配置

Fig.1 Configuration of improved AHSVC

其中, U_g 是发电机端电压, U_H 是升压变压器高压侧电压, Q_g 、 P_g 分别是发电机的无功、有功功率, X_t 是升压变压器电抗, X_{dr} 是设定的电压下降率电抗, 即电压随无功电流下降的斜率, n 是变压器分接头位置。

2 改进 AHSVC 的基本原理

用于说明改进 AHSVC 基本原理的系统单线图如图 2 所示。 X_e 是外电路电抗。

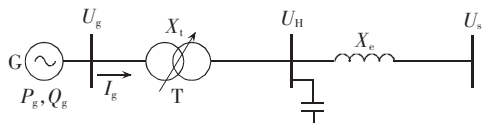


图 2 改进 AHSVC 示意系统

Fig.2 Power system with improved AHSVC

2.1 基本方程

由图 2 可知,升压变压器低压侧电压 U_g 和高压侧电压 U_H 的关系为

$$U_g = U_H + jX_t I_g \quad (1)$$

其中,发电机电流 $I_g = P_g / U_g - jQ_g / U_g$,取机端电压为参考电压,即 $U_g = U_g \angle 0^\circ$,升压变压器电阻很小,可忽略不计。在这种情况下,高压侧的电压实际为

$$U_H = U_{Href} - X_{dr} I_q \quad (2)$$

理论上,由式(1)可知,通过 X_t 的补偿来控制 U_g ,可使变压器高压侧电压达到指定的目标值 U_{Href} 。但对 2 台以上的发电机通过 1 台升压变压器并列运行的情况,会引起发电机的电流及无功功率不平衡的问题。为此,引入一个下降率电抗 X_{dr} ,即在式(2)中,通过 X_{dr} 控制 U_H ,使之达到目标值 U_{Href} 。 X_{dr} 对于多机之间的稳定并列运行是非常必要的。一般 X_{dr} 可取 0.01~0.05 p.u.。

2.2 目标设定电压的基本计算

图 2 所示系统中,发电机有功、无功功率及升压

变压器高、低压侧电压之间的关系如下:

$$P_g = U_g U_H \sin \delta / X_t \quad (3)$$

$$Q_g = (U_g^2 - U_g U_H \cos \delta) / X_t \quad (4)$$

式中 δ 为 U_g 与 U_H 之间的夹角。

由式(4)得:

$$U_H = (U_g^2 - X_t Q_g) / (U_g \cos \delta) \quad (5)$$

因 X_t 相对较小, $\cos \delta$ 近似为 1,式(5)可简化为

$$U_H = U_g - X_t Q_g / U_g \quad (6)$$

机端电压的设定值 U_{gref} 可以根据高压侧的设定值 U_{Href} 确定,即

$$U_{gref} = U_{Href} + (X_t - X_{dr}) I_q \quad (7)$$

2.3 目标设定电压的改进计算

改进 AHSVC 与已有 AHSVC^[13]的主要区别是引入了发电机的有功电流部分,由式(1)可得 U_g 、 I_g 和 U_H 的向量关系如图 3 所示。

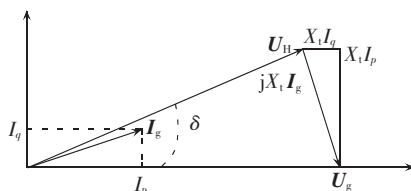


图 3 U_g 、 I_g 和 U_H 的向量关系

Fig.3 Vector diagram of U_g , I_g and U_H

选 U_g 为参考向量,即 $U_g = U_g \angle 0^\circ$,则 $U_H = U_H \angle \delta$ 。 U_H 与 U_g 的关系如下:

$$U_H = \sqrt{(U_g - X_t I_p)^2 + (X_t I_q)^2} \quad (8)$$

式中 发电机的有功和无功电流分别为 $I_p = P_g / U_g$, $I_q = Q_g / U_g$ 。

为了使高压侧电压保持为指定的目标值,机端电压的设定值应按式(9)计算:

$$U_{gref} = \sqrt{U_{Href}^2 - (X_t I_p)^2} + X_t I_q \quad (9)$$

为了保证并列发电机的稳定运行,在式(9)中引入下降率电抗,得式(10):

$$U_{gref} = \sqrt{U_{Href}^2 - [(X_t - X_{dr}) I_p]^2} + (X_t - X_{dr}) I_q \quad (10)$$

将式(10)进一步调整为式(11),使得恒有 $U_H = U_{Href} - X_{dr} I_q$,即

$$U_{gref} = \sqrt{(U_{Href} - X_{dr} I_q)^2 - (X_t I_p)^2} + X_t I_q \quad (11)$$

2.4 下降率电抗 X_{dr} 的作用

U_H 与 X_{dr} 之间的关系见图 4。由图 4 可知,引入 X_{dr} 以后,高压侧电压随无功电流增大而线性下降, X_{dr} 越大,高压侧电压下降也越多。

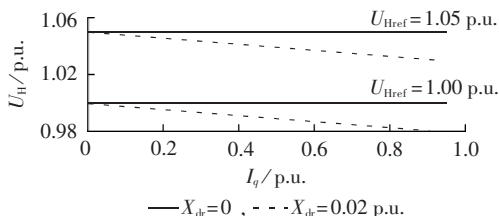


图 4 AHSVC 的特性

Fig.4 Characteristic of AHSVC

3 仿真分析

对图 2 所示系统进行仿真分析,设仿真参数为:发电机 $S_N=95 \text{ MV}\cdot\text{A}$, $U_N=13.8 \text{ kV}$, $\cos \Phi=0.98$;系统 $X_1=0.069 \text{ p.u.}$, $X_e=0.05 \text{ p.u.}$;电容器组为 $150 \text{ MV}\cdot\text{A}$;基准功率为 $1000 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 。

所采用的常规励磁调节器的传递函数框图如图 5 所示。有关参数及符号含义详见文献[14-15]。

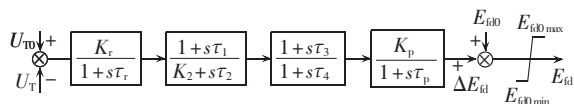


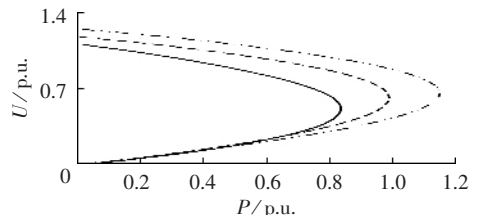
图 5 AVR 框图

Fig.5 Block diagram of AVR

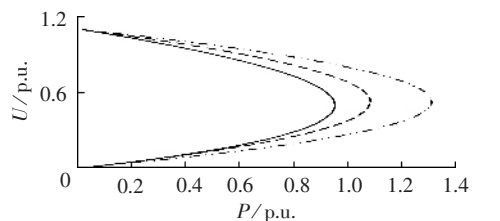
3.1 对系统极限传输能力的影响

改进的 AHSVC 提高了系统的电压水平,缩短了发电机与系统负荷之间的电气距离,因而增强了系统的极限传输能力。

负荷采用恒功率模型。分别运用 SVC 维持机端电压恒定和改进的 AHSVC 维持高压端电压恒定,计算得到的 $P-U$ 曲线如图 6(a)(b)所示。从图 6 可知,改进的 AHSVC 通过将曲线的“鼻端”推后使运行点远离临界点来提高电力系统的极限传输能力。另外,由于改进的 AHSVC 能安装在所有发电机上,所以能够在励磁极限范围内,充分利用发电机的已有容量。



——基本情况, --- 100 MV·A, -·-·- 200 MV·A
(a) SVC 控制



——基本情况, --- $X_d=0.05 \text{ p.u.}$, -·-·- $X_d=0.01 \text{ p.u.}$
(b) 改进 AHSVC 控制

图 6 $P-U$ 特性曲线

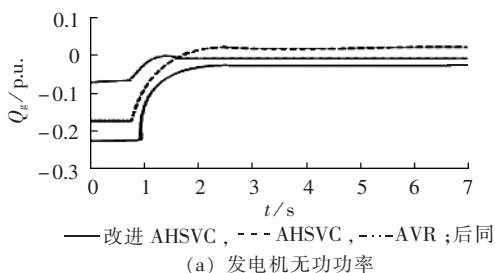
Fig.6 $P-U$ curves

3.2 对无功功率突变的响应

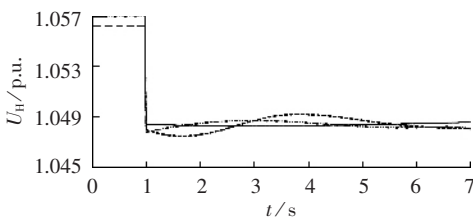
在 1 s 时,切除电容器组,得到的发电机无功功率、高压侧电压随时间的变化曲线分别如图 7(a)(b)所示。由图可知:扰动后,改进的 AHSVC 为系统提供的无功比 AVR 大得多,更有利于系统的稳定。

3.3 对动态电压稳定性的影响

为了比较所提方法对提高稳定性的效果,对图 2 所示系统,在靠近变压器高压侧母线,设置三相断线故障,仿真结果如图 8 所示,其中列出了系统在 3 种控制方式下变压器高压侧节点电压幅值和无功功率



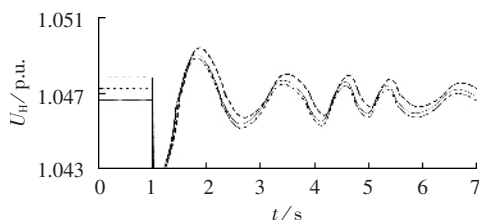
(a) 发电机无功功率



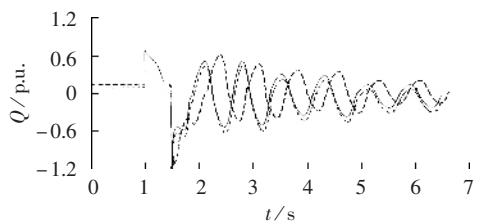
(b) 高压侧高压

图 7 切除电容器组的响应

Fig.7 Respond to switching off capacitor bank



(a) 高压侧电压



(b) 无功功率

图 8 稳定性的改善

Fig.8 Improvement of stability

的变化情况。由仿真结果可看出,采用改进的 AHSVC 时,系统的电压水平有明显的改善。而且改进的 AHSVC 比已存在的 AHSVC 更好一些。

4 结论

在阐述 AHSVC 基本原理和特性的基础上,提出了一种对其改进的方法,分析了该方法在增强电力系统电压稳定性方面的作用。

a. 改进的 AHSVC 明显改善电压稳定性。它能够准确控制升压变压器高压侧电压为给定值,与常规励磁调节器及静止无功补偿器相比,能更好地维持传输网络良好的电压分布和较高的电压水平,提高输电网络的极限传输能力,改善系统动态电压稳定性,防止电压崩溃的发生。

b. 改进的 AHSVC 实现方便且经济。它不同于通常的高压侧电压控制,不需要直接提取高压侧电压作为反馈信号,从而不需要安装昂贵的高压侧检测设备,因此,在经济上也具有优越性,可用于实际系统。

c. 改进的 AHSVC 可提高并列运行机组的可靠性。 U_{Hed} 可以在当地或远方直接设定为指定的目标值,便于实现多机电厂或变电站的电力系统电压的协调控制,其发电厂的现有容量可以更好地得到利用。

d. 改进的 AHSVC 可同时计及发电机有功、无功电流的影响,明显提高了电压目标设定值的准确性。

今后应加强对多机系统的研究及如何通过使用改进的 AHSVC 来改善暂态稳定的控制方法。

参考文献:

- [1] TAYLOR C W. Power system voltage stability[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [2] 王宝华,杨成悟,张强. 电力系统分岔与混沌研究综述[J]. 电工技术学报, 2005, 20(7): 1-10.
WANG Bao-hua, YANG Cheng-wu, ZHANG Qiang. Summary of bifurcation and chaos research in electric power system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(7): 1-10.
- [3] 周双喜,朱凌志,郭锡钦,等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京:中国电力出版社, 2004.
- [4] MARTINS N. The new CIGRE task force on coordinated voltage control in transmission networks[C]//Proceeding of 2000 IEEE PES Summer Meeting. Seattle, WA, USA: [s.n.], 2000: 305-306.
- [5] TAYLOR C W. Line drop compensation, high side voltage control, secondary voltage control—why not control a generator like a static var compensator [C]//Proceeding of 2000 IEEE PES Summer Meeting. Seattle, WA, USA: [s.n.], 2000: 307-310.
- [6] 周晓源,邱家驹,陈新琪,等. 高压侧电压控制对单机-无穷大系统稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 60-63.
ZHOU Xiao-yuan, QIU Jia-ju, CHEN Xin-qi, et al. Effects of high side voltage control on stabilities for one machine infinite bus[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 60-63.
- [7] DAVIES J B, MIDFORD L E. High side voltage control at Manitoba hydro [C]//Proceeding of 2000 IEEE PES Summer Meeting. Seattle, WA, USA: [s.n.], 2000: 271-277.
- [8] NOGUCHI S, SHIMOMURA M, PASERBA J, et al. Field verification of an advanced high side voltage control at a hydro power station [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 693-701.
- [9] 王琦,周双喜,朱凌志. 采用高压侧电压控制改善系统的角度稳定性[J]. 电网技术, 2003, 27(6): 19-21.
WANG Qi, ZHOU Shuang-xi, ZHU Ling-zhi. Improvement of angle stability by advanced high side voltage control regulator

- [J]. Power System Technology, 2003, 27(6): 19-21.
- [10] 孙元章,姚小寅,刘锋. 二级电压控制对电力系统稳定的影响[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 28-32.
SUN Yuan-zhang, YAO Xiao-yin, LIU Feng. The impact of secondary voltage control on power system stability [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(2): 28-32.
- [11] 周晓源,邱家驹,周宏. 高压侧电压控制对电压稳定性的影响[J]. 高电压技术, 2005, 31(11): 83-85.
ZHOU Xiao-yuan, QIU Jia-ju, ZHOU Hong. Effects of high voltage side voltage control on power system voltage stabilities [J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(11): 83-85.
- [12] 王琦,朱凌志,安宁,等. 采用先进的高压侧电压控制改善电压稳定性[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2004, 44(1): 102-105.
WANG Qi, ZHU Ling-zhi, AN Ning, et al. Improvement of voltage stability with an advanced high side voltage control regulator [J]. Journal of Tsinghua University: Sci & Tech, 2004, 44(1): 102-105.
- [13] KITAMURA H, SHIMOMURA M, PASERBA J. Improvement of voltage stability by the advanced high side voltage control regulator [C]//Proceeding of 2000 IEEE PES Summer Meeting. Seattle, WA, USA: [s.n.], 2000: 278-284.
- [14] 安宁,张丽,朱凌志,等. 采用先进的高压侧电压控制改善阳城-淮阴 500 kV 交流系统性能[J]. 中国电力, 2004, 37(3): 14-18.
AN Ning, ZHANG Li, ZHU Ling-zhi, et al. Enhancement of Yangcheng-Huaiyin 500 kV AC transmission system's performance by an advanced high side voltage control regulator [J]. Electric Power, 2004, 37(3): 14-18.
- [15] 周小尧,鞠平. 用于电压稳定分析的配电网等值[J]. 电工技术学报, 2001, 16(6): 76-80.
ZHOU Xiao-yao, JU Ping. Dynamic equivalents of distribution systems for voltage stability studies [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16(6): 76-80.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:



赵兴勇

赵兴勇(1965-),男,山西太原人,副教授,博士研究生,主要研究方向为电力系统电压稳定、电力系统分析与控制(E-mail: zhaoxingyong@sytu.edu.cn);

张秀彬(1946-),男,福建福州人,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统安全经济运行、电力系统分析等方面的教学和研究工作。

Advanced high side voltage control improves voltage stability

ZHAO Xing-yong, ZHANG Xiu-bin

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: An improved AHSVC (Advanced High Side Voltage Control) is presented, which introduces supplemental control to conventional generator excitation system. Its working principle, characteristics and implementations are described. The existing AHSVC ignores the influence of active current on voltage stability, while the improved control considers the voltage drop caused by both active and reactive currents according to rigorous theoretic deduction in generator terminal voltage calculation and introduces the ramp reactance to balance the current and reactive power among the parallel generators. The high side voltage of a step-up transformer is controlled accurately by the setting of generator terminal voltage. Simulation results prove the effectiveness and practicability of the improved method. It is relatively cheap and easy to be implemented because no feedback signal from the high voltage side is needed.

Key words: power system voltage stability; excitation system; automatic voltage regulator; advanced high side voltage control; supplemental control