

大电网发电机组电压调差系数优化和整定方法

杨桂钟¹, 林 因², 董树锋³

(1. 福建电力调控中心 福建 福州 350003;

2. 福建省电力有限公司电力科学研究院 福建 福州 350007;

3. 浙江大学 电气工程学院 浙江 杭州 310027)

摘要: 提出了以提高系统稳定性为目标的机组调差系数优化整定理念和方法。利用该方法得到的机组调差系数,可以在提高系统同步转矩的同时不会造成阻尼转矩的恶化,有利于系统在受到扰动时保持稳定运行;仿真算例证明了该方法的有效性;编写了用于专门针对机组调差系数优化整定的软件,并在实际电网中投入使用,取得了良好的应用效果。

关键词: 调差系数; 稳定性; 优化; 发电机组

中图分类号: TM761

文献标识码: A

文章编号: 1004-3950(2015)03-0025-05

DOI:10.16189/j.cnki.nyg.2015.03.005

Optimization and setting method for voltage adjustment ratio

YANG Gui-zhong¹, LIN Yin², DONG Shu-feng³

(1. Fujian Electric Power Dispatching and Control Center, Fuzhou 350003, China;

2. Electric Power Research Institute of Fujian Electric Power Company Limited, Fuzhou 350007, China;

3. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 300027, China)

Abstract: An optimization and setting method for voltage adjustment ratio (VAR) of generating unit was proposed, whose optimization object was to improve system's stability. Optimized VAR obtained by proposed method can improve synchronizing torque while not worsening the damping torque. Simulation cases proved the validity of the proposed method. Software for VAR optimization was developed and good application effect was achieved in practical.

Key words: voltage adjustment ratio (VAR); stability; optimization; generating unit

0 引言

励磁系统中的调差称为电压调差率或者无功调差率。我国励磁系统国标对电压调差率的定义是:发电机在功率因数等于零的情况下,无功电流从零变化到额定定子电流值时,发电机端电压的变化率^[1]。在现代广泛采用的快速励磁系统中,由于自然调差率很小,所以附加调差对改善系统电压稳定性、改善发电厂间的无功分配有十分明显的作用。

目前存在两种调差系数整定的思路:

一是根据简单整定原则进行整定^[1-4]。对于并列运行的机组,为保证机组的稳定运行和无功的合理分配,原则上要求各机组在并列点具有正

调差且调差系数完全相等,一般可取调差系数3%~5%。对于通过变压器并列方式,如果发电机通过变压器在高压母线并列,并列点的调差系数需考虑变压器的压降作用。由于各电厂的励磁方式、接线方式和运行情况各不相同,各有其特点,电网中每个节点对无功需求不同,每个电厂机组的开环放大倍数、闭环放大倍数以及励磁系统AVR的PID构成也不一样,电网对电压调差率的要求显然也是不相同的,按常规值整定存在不合理的地方。

另外一种思路是从静态的角度出发^[5-6],提出电力系统发电机励磁系统中负荷补偿系数的优化模型和优化方法,建立以系统有功网损为最小的目标函数、电网潮流方程为约束条件和发电机

收稿日期: 2014-12-29

基金项目: 教育部博士点基金(20120101120157)

作者简介: 杨桂钟(1965—),男,江西南昌人,高级工程师,主要从事电力系统运行管理工作。

能源工程 2015 年 第 3 期 - 25 -

升压变压器阻抗为控制变量的优化模型,该模型是一个优化潮流的应用。该方法只对特定断面进行优化,不同运行情况具有不同的整定值,而目前还无法做到机组调差率实时整定,整定值一旦确定,通常几个月或半年均不会改动,由于电网负荷在实时发生变化,因此该方法获得的整定值在实际中的运行效果难以保证,同时,该方法要求进行全网优化,对于复杂电网,计算量较大,编程复杂。

目前,国内发电机的电压调差率一般是由调度部门按常规值进行整定。在国外成功应用的先例中,也是大致地限定在某较合理的补偿范围内^[5]。

不少学者已经认识到发电机励磁系统的附加调差系数会对系统稳定性产生影响^[7-11],而目前研究和应用中还没有从提高系统稳定性的角度来研究电压调差系数的整定方法,针对上述问题,本文中提出以改善系统动态性能为目标的大电网发电机组电压调差系数优化和整定方法,该方法能够显著提高电网的安全稳定性,无论从电网稳定性理论上还是从工程价值上看,这都是一个十分有意义的研究课题。

1 系统稳定性指标

1.1 不考虑附加调差后的稳定指标公式

在研究机组的动态稳定性时通常采用单机无穷大系统进行研究,系统的阻尼转矩和同步转矩是两个重要的稳定性指标,本节中介绍电网中单机无穷大系统的阻尼转矩和同步转矩的计算方法。

在发电机励磁控制系统中,发电机负荷补偿实现方式如图1所示。图1中, U_t 为发电机机端电压; X_T 为升压变压器电抗; X_L 为传输线电抗; U_s 为无穷大系统电压; I_Q 为发电机发出的无功电流。

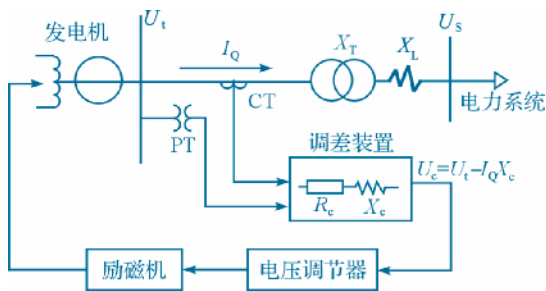


图1 机组电压调差实现方式

负荷补偿的控制目标是保持图中的 U_c 恒定

$$U_c = U_t - I_Q X_c \quad (1)$$

式中: X_c 是要补偿掉的升压变压器的一部分电抗。

以单机无穷大系统为例,它的等值电路如图2所示。图2中, E' 为发电机暂态电势; x'_d 为发电机d轴暂态电抗; V_H 为升压变压器高压侧电压。

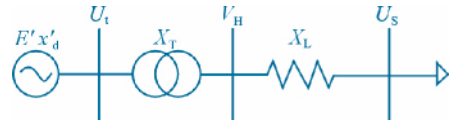


图2 单机无穷大系统

考察如图2所示的单机无穷大系统,发电机采用三阶实用模型,励磁系统用一阶惯性环节描述,假设机械功率恒定。发电机在dq坐标的标幺值数学模型如式(2)所示:

$$\begin{cases} T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt} = E_f - E_q = E_f - [E'_q + (x_d - x'_d) I_d] \\ M \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e - D(\omega - 1) \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega - 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_e = E'_q I_q + (x_d - x'_d) I_d I_q$; E_f 为励磁系统输出电压; P_m 为机械功率。

励磁系统考虑为一阶惯性系统,传递函数为 $G_e = K_A / (1 + T_A s)$ 。线性化后的完整系统框图如图3所示。

图3中系数 $K_1 \sim K_6$ 是和系统结构、参数、运行工况有关的常数^[12],表达式如下:

$$K_1 = \frac{E'_{q0} U_s \cos \delta_0}{X'_d \Sigma} + \frac{(X'_d - X_d) U_s^2 \cos 2\delta_0}{X'_d \Sigma X_d \Sigma} \quad (3)$$

$$K_2 = (U_s \times \sin \delta_0) / X'_d \Sigma \quad (4)$$

$$K_3 = X'_d \Sigma / X_d \Sigma \quad (5)$$

$$K_4 = \frac{(X_d - X'_d)}{X'_d \Sigma} U_s \sin \delta_0 \quad (6)$$

$$K_5 = \frac{\partial U_t}{\partial \delta} = \frac{U_{td} U_s X_q \cos \delta_0}{U_t X_q \Sigma} - \frac{U_{tq} U_s X'_d \sin \delta_0}{U_t X'_d \Sigma} \quad (7)$$

$$K_6 = \frac{\partial U_t}{\partial E'_q} = \frac{U_{tq} (X_d \Sigma - X_d)}{U_t X'_d \Sigma} \quad (8)$$

经过推导和简化可以得到励磁系统附加同步转矩系数 ΔT_s 和附加阻尼转矩系数 ΔT_D 分别

为^[5]:

$$\Delta T_s = \frac{-K_2 K_5 K_A \left[\frac{1}{K_3} \right] + K_6 K_A - T'_{d0} T_A \omega^2}{\left[\frac{1}{K_3} \right] + K_6 K_A - T'_{d0} T_A \omega^2 + [T'_{d0} + (T_A/K_3)]^2 \omega^2} \quad (9)$$

$$\Delta T_D = \frac{K_2 K_5 K_A \left[\frac{T_A}{K_3} \right] + T'_{d0}}{\left[\frac{1}{K_3} \right] + K_6 K_A - T'_{d0} T_A \omega^2 + [T'_{d0} + (T_A/K_3)]^2 \omega^2} \quad (10)$$

1.2 考虑附加调差后的稳定指标公式

由于采用负荷补偿(高压侧电压控制)和机端电压控制(TVC)的控制结构相同,两者并未对图3所示的单机无穷大系统各个参数之间的关系产生影响。加入负荷补偿之后,参数 K_5 、 K_6 用下面两式代替:

$$K_5 = \frac{\partial U_c}{\partial \delta} = \frac{U_{cd} U_s (X_q + X_c) \cos \delta_0}{U_c X_q \Sigma} - \frac{U_{cq} U_s (X'_d + X_c) \sin \delta_0}{U_c X'_d \Sigma} \quad (11)$$

$$K_6 = \frac{\partial U_c}{\partial E'_q} = \frac{U_{cq} (X_d \Sigma - X_d - X_c)}{U_c X'_d \Sigma} \quad (12)$$

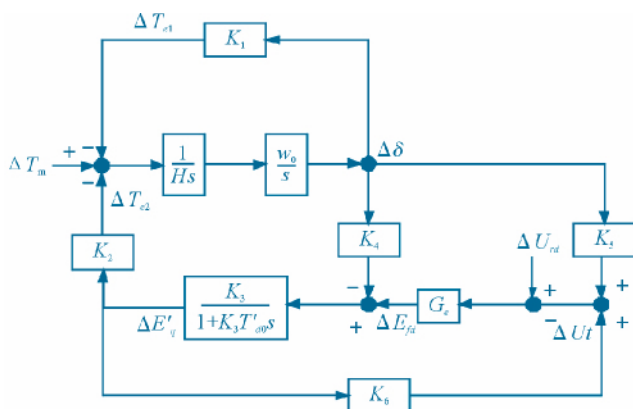


图3 单机无穷大系统框图

2 机组调差系数优化方法

2.1 数学模型

由式(9)、式(10)、式(11)、式(12)可得: ΔT_s 和 ΔT_D 与调差系数、发电机参数、运行工况、励磁参数有关,在发电机参数、运行工况、励磁参数确定的情况下, ΔT_s 和 ΔT_D 是调差系数的函数,取

$$f(X_c) = \Delta T_s \quad (13)$$

可以通过求解下面优化问题得到调差系数的整定值:

$$\begin{aligned} & \min [-f(X_c)] \\ & \begin{cases} X_c \leq X_{cmax} \\ X_c \geq X_{cmin} \\ \Delta T_D \geq \Delta T_{Dmin} \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

其中 X_{cmax} 和 X_{cmin} 的作用是保证机端电压不能升高也不能太低,可以根据经验或国网标准进行给定。式(14)是一个非线性规划问题,本文中采用现代内点法^[13]进行求解。

2.2 上下限设定方法

附加调差系数的上下限根据文献[4](下面简称《技术条件》)进行限定,具体设定步骤如下。

(1)《技术条件》规定:当发电机无功电流由零增加到额定无功电流时,发电机电压变化不大于5%。上述规定可以表示为:

$$-0.05 \times \frac{S_n}{Q_n} \leq X_c \leq 0.05 \times \frac{S_n}{Q_n} \quad (15)$$

式中: S_n 为发电机额定视在功率; Q_n 为发电机额定无功电流。

《技术条件》中以发电机额定无功功率为基准,而励磁系统附加调差系数以额定视在功率为基准,所以在数值上要乘 S_n/Q_n 。

(2)《技术条件》规定:并列点的电压调差率按照5%~10%整定。对于发电机变压器组,设以机组视在功率为基准的变压器电抗为 X_T ,则并列点的总附加调差为 $X_T - X_c$,由《技术条件》规定可以得到:

$$0.05 \times \frac{S_n}{Q_n} \leq X_T - X_c \leq 0.1 \times \frac{S_n}{Q_n} \quad (16)$$

进而得到励磁系统的附加补偿系数的范围为:

$$X_T - 0.1 \times \frac{S_n}{Q_n} \leq X_c \leq X_T - 0.05 \times \frac{S_n}{Q_n} \quad (17)$$

(3)由式(15)和式(17)获得励磁系统的附加调差系数范围的两个区间,最终的励磁系统的附加调差系数是这两个区间的交集,表示为:

$$\begin{cases} X_c \geq \max \left(-0.05 \times \frac{S_n}{Q_n}, X_T - 0.1 \times \frac{S_n}{Q_n} \right) \\ X_c \leq \min \left(0.05 \times \frac{S_n}{Q_n}, X_T - 0.05 \times \frac{S_n}{Q_n} \right) \end{cases} \quad (18)$$

3 仿真算例

以某电厂机组为例进行仿真验证。该机组参数如下: $X'_d = 0.247$, $X'_q = 0.394$, $X_d = 2.04$, $X_q = 1.99$, $T'_{do} = 8.2$, $T'_{qo} = 2.2$, 励磁增益 $K_a = 304$, 励磁时间常数 $T_a = 0.003$, 升压变压器电抗 $X_T = 0.121$, 通过双回线和无穷大系统相连, 每回电抗为 0.04528 。仿真条件为: 在单机无穷大系统中, 单回线路中间发生三相短路 0.1 s 之后故障消除。优化前该实际调差系数为 -0.025 , 优化后为 -0.0611 。图 4、图 5 为优化前后仿真曲线。从仿真结果可以发现, 优化后的参数能够改善系统的阻尼, 提高同步转矩, 帮助系统在故障后快速恢复稳定。

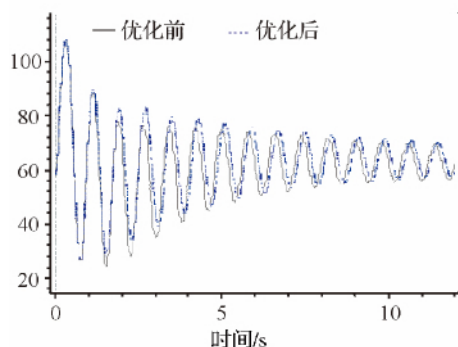


图4 发电机功角曲线

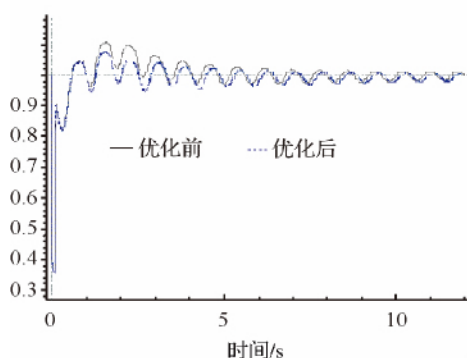


图5 发电机机端电压曲线

4 实际应用情况

为验证上述方法的有效性, 本文中对调差率优化前后福建电网进行仿真分析, 稳定计算分析采用中国电科院 BPA 软件。

(1) 采用两个故障进行仿真。故障 1: 宁双其中一回线路在宁德一侧发送三相短路故障, 5 个周波后线路被切除, 故障消失; 故障 2: 大唐至宁德其中一回 500kV 线路在大唐一侧发生三相短路故障, 4.5 个周波后大唐侧线路开关断开, 5 个周波后宁德侧线路开关断开, 故障消失。

(2) 对优化前后系统小干扰稳定的振荡频率和振荡阻尼进行计算, 分析优化后的调差率对系统阻尼的影响。

图 6 和图 7 是 2012 年度大方式下仿真曲线, 表 1 是 2012 ~ 2014 年度大方式下的振荡阻尼计算结果。

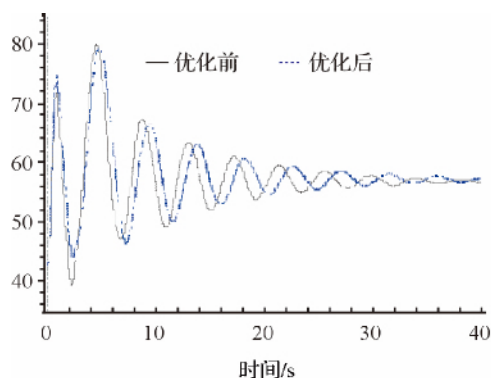


图6 机组闽后石_3 故障 1 下发电机功角曲线

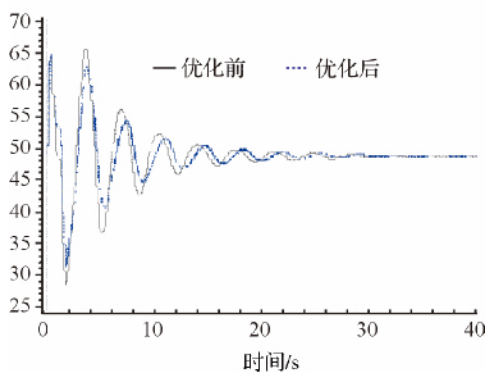


图7 机组闽可门_4 故障 2 下发电机功角曲线

表 1 福建电网振荡阻尼计算结果

运行方式	运行条件	振荡频率	振荡阻尼
2012 年大方式	优化前	0.328	0.199
	优化后	0.325	0.211
2013 年大方式	优化前	0.326	0.194
	优化后	0.325	0.199
2014 年大方式	优化前	0.316	0.196
	优化后	0.316	0.204

从上述仿真结果可以发现:

(1) 在故障 1 的情况下, 使用优化后的附加调差系数后, 大部分机组的功角曲线的尖峰不如

优化前明显,说明优化后的附加调差系数能够改善系统的阻尼。

(2) 在故障 2 的情况下,使用优化后的附加调差系数后,机组功角曲线往往在第二个周波的摆幅已经明显变小,说明优化后的附加调差系数在故障下能使机组更快地恢复平稳,有利于机组的功角稳定性。

(3) 对于小干扰稳定,在不同方式下优化后的调差率均没有恶化系统的阻尼,甚至还略有提升,有利于系统的小干扰稳定性。

5 结 论

通过分析机组调差系数与稳定指标之间的关系,以此为基础,从优化的角度提出发电机电压调差系数整定的数学模型和以稳定指标最大为目标的优化模型。同时,编写用于专门针对机组调差系数优化整定的软件,该软件能够与 BPA 软件结合,为调差率整定、仿真验证和校核提供便利的工具。该工具在实际电网中投入使用的效果较好。

但是,本文中传统调差系数计算方法的结果做为优化数学模型中的上下限,因此计算结果相对比较保守,后续研究中应该进一步研究上下限设定的规则或方法;并且考虑调差系数对全网无功合理分配、降低网络损耗的作用,即考虑稳定性的同时,从全网的角度,进一步优化网络无功,从而提出新的优化计算方法和整定软件。

参考文献:

- [1] 方思立,苏为民.大型发电机调差率整定及调试[J].中国电力,2006,39(8):12-15.
- [2] 霍承祥,刘增煌,濮 钧.励磁附加调差对电力系统阻尼特性影响的机理分析[J].大电机技术,2012(2):53-57.
- [3] 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.
- [4] DL/T 843-2010.大型汽轮发电机励磁系统技术条件[S].北京:中国电力出版社,2011.
- [5] 孙元章,贾 宇,程 林,等.发电机励磁控制中负荷补偿系数的优化[J].中国电机工程学报,2006,26(23):20-24.
- [6] 张会荣,文 静,李红君.励磁系统中高压侧电压控制的优化[J].黑龙江电力,2010,32(6):401-403.
- [7] 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.
- [8] 武 诚,徐 政,常 勇.高压侧电压控制对电力系统小扰动稳定性的影响[J].电工技术学报,2009,24(1):146-151.
- [9] 程 林,孙元章,贾 宇,等.发电机励磁控制中负荷补偿对系统稳定性的影响[J].中国电机工程学报,2007,27(25):32-37.
- [10] 周晓渊,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):83-84.
- [11] 周晓渊,邱家驹,陈新琪.高压侧电压控制对单机一无穷大系统稳定性的影响[J].中国电机工程学报,2003,23(1):60-63.
- [12] KUNDUR P.电力系统稳定与控制[M].北京:中国电力出版社,2002.
- [13] WÄCHTER A, BIEGLER L T. On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming[J]. Mathematical Programming, 2006, 106: 25-57.