

优化电网运行的发电机组励磁调差系数研究

提出了区域电网调差系数的概念。建立了计及发电机组励磁调差系数的电力系统潮流计算模型和发电机组励磁调差系数优化模型。分析了发电机组励磁调差系数对系统功角稳定性的影响。根据不同地区电网的无功电压调节要求、电网运行方式和负荷的变化,应用所提出的计及电网全运行方式下优化电网运行的发电机组励磁调差的方法,经过多次电力系统潮流计算,对吉林省内发电机组励磁调差系数进行整定。分别通过电网实测数据和仿真计算结果的对比分析,验证了所提出的发电机组励磁调差系数整定方法可以提高电网的电压运行水平,合理的调差系统可以提高电网的稳定水平。

姜 旭 王春华/国网吉林省电力有限公司
周毅博/东北电力大学电气工程学院

0 引言

同步发电机既是电力系统中的有功电源,也是重要的无功电源,发电机组励磁调差系数决定发电机无功电压调节特性,直接影响发电机电压水平和并联机组之间的无功分配,是网源协调中对电网影响较大的重要机组参数。一直以来,由于发电机的无功出力可以人工进行调整和通过AVC进行调整,所以发电机组励磁调差系数整定工作没有引起广大工程技术人员和学者的足够重视,整定方法上,也只是从发电厂母线运行电压和并联机组之间的无功分配角度进行整定的。由于发电机的无功调节具备可快速自动调节、能够实现连续调整 and 不需要附加投资等优点,所以应深入挖掘发电机的无功调节能力,使其在电网无功电压调整过程中发挥更为重要的作用,提高电网的电压运行水平和电网稳定运行水平。

目前关于发电机组调差系数分析的文献报道相对较少。文献[1]、文献[2]对发电厂发电机组调差系数的整定问题进行了分析。文献[3]较为详细地分析了负荷补偿对电力系统稳定性的影响,同发电机励磁系统内的附加调差概念基本一致。文献[4]分析了并列运行机组无功分配与调差系数的关系问题。文献[5]分析了不同发电机接线方式下调差系数的整定原则。文献[6-8]提出了一种调差系统优化整定方法。文献[9-11]初步分析了调差系数对稳定的影响。可见,目前的研究主要集中在整定、无功分配分析上,在发电机组励磁调差系数对电网的影响和优化方面的研究还有待进一步加强。

本文提出了区域电网调差系数的概念,建立了相应的优化、计算模型,根据不同地区电网的无功电压调节要求,通过考虑电网运行方式和负荷变化的电力系统潮流计算,对各地区电网内发电机组励磁调差系数进行分别整定,给出整定发电机组励磁调差的方法。通过对重新整定前后的电网实测数据和仿真计算对比分析,验证了合理整定发电机组励磁调差系数可以提高电网的电压运行水平和电网稳定运行水平。

1 区域电网综合调差系数

1.1 发电机组综合调差系数

发电机组综合调差系数定义:高压侧母线电压 U 变化量与发电机无功功率 Q_G 变化量的关系为

$$\beta = -\frac{\Delta U_*}{\Delta Q_{G*}} \times 100\% \quad (1)$$



姜 旭/高级工程师

关键词/Keywords

调差系数·
区域电网·
无功·

如图1所示, $\beta < 0$ 为负调差, $\beta > 0$ 为正调差。负调差对于电压调整为正反馈, 正调差对于电压调整为负反馈。对于火电机组为保证电压稳定, 主变压器高压侧等效调差系数一般采用正调差。

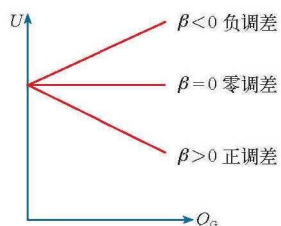


图1 调差系数示意图

目前大型火力发电机组一般采用发电机—变压器单元接线方式, 并联运行机组通过高压侧母线并联, 并联点处综合调差系数决定了各机组之间的无功分配关系。

对于单元接线发电机组励磁调差系数需要通过给定发电机自动励磁调节器 (AVR) 中附加调差系数来设置。发电机组综合调差系数与AVR附加调差系数关系为

$$\beta_{ZH} = \beta_{FJ} + X'_T \quad (2)$$

式中, β_{ZH} 为发电机组综合调差系数; β_{FJ} 为AVR附加调差系数; X'_T 为变压器阻抗压降折算值。

1.2 区域电网综合调差系数定义

由于电网内不同地区无功电源、电网结构和无功负荷分布不完全相同, 各地区无功电压调节要求也不尽相同, 并且对于各地区电网之间的功率交换也有着严格的规定。因此应根据电气紧密程度对电网进行分区, 根据不同地区的无功电压调节要求, 对各地区电网内发电机组调差系数进行分别整定。

在对地区电网内发电机组调差系数进行整定时应遵守电网无功功率“分层分区, 就地平衡”的原则。原则上, 一个分区内发电机组无功电源应能够平衡并网电压等级电网输电线路的无功和经下一层电压等级电网平衡之后的无功需求, 避免和减少不合理的无功流动, 达到无功潮流最优, 如式 (3)、式 (4) 所示。

$$\sum Q_G + \sum Q_L + \sum Q_{Line} = 0 \quad (3)$$

$$\min f = P_{Loss} = \sum (P_{ij} + P_{ji}) \quad (4)$$

式中, $\sum Q_G$ 为区域内发电机组总的无功功率; $\sum Q_L$ 为下一层电压等级电网无功需求; $\sum Q_{Line}$ 为线路无功。

合理整定分区内各发电厂机组高压侧母线的调差, 可以使发电厂的电压调整具有一致性。基于这一目的整定的调差系数称为区域电网调差系数。

2 地区电网综合调差系数整定方法

目前潮流计算中一般将发电机节点分为PV、PQ和Vθ节点三种类型, 并未有计及发电机组综合调差系数的发电机节点类型。本文首先需要根据调差系数定义建立计及综合调差系数的潮流计算模型, 在此基础上提出计及电网全运行方式的调差系数计算整定方法。

2.1 计及综合调差系数的电力系统潮流计算模型

考虑发电机组综合调差系数 β_{ZH} 的发电机节点为Pβ型, 发电机无功功率和电压幅值符合如下关系为

$$\beta_{ZH} = -\frac{V_{ref} - V_G}{Q_{ref} - Q_G} \quad (5)$$

式中, V_{ref} 为发电机组电压目标值; V_G 为发电机组实际电压; Q_{ref} 为发电机组无功功率参考值; Q_G 为发电机组无功功率。

节点功率平衡方程为

$$P_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (6)$$

$$i = 1, \dots, n-1$$

$$Q_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (7)$$

$$i = 1, \dots, n-m-1$$

式中, n 为节点总数, m 为PV节点数。

假设系统有 r 个Pβ发电机节点, 对 r 个Pβ节点将式 (5) 代入式 (7), 可得计及综合调差系数的电力系统潮流计算模型为

$$P_i - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (8)$$

$$i = 1, \dots, n-1$$

$$\left(\frac{V_{i\text{ref}} - V_i}{\beta_i} + Q_{i\text{ref}} \right) - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0$$

$$i = 1, \dots, r \quad (9)$$

$$Q_i - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0$$

$$i = r+1, \dots, n-m-1 \quad (10)$$

2.2 发电机组综合调差系数优化模型

在潮流计算中，除平衡节点以外，其他各节点有功功率均为已知量，系统有功功率损耗最小与平衡节点有功功率最小等价。因此，优化模型以平衡节点有功功率最小为优化目标。

此外，由于发电机组综合调差系数反映了发电机无功功率与电压幅值的关系，因此改变发电机组综合调差系数对电压相角影响较小。因此，等式约束只考虑了各节点无功功率平衡方程式。

优化模型为

$$\min f = P_s = U_s \sum_{j \in s} U_j (G_{sj} \cos \theta_{sj} + B_{sj} \sin \theta_{sj}) \quad (11)$$

$$\left(\frac{V_{i\text{ref}} - V_i}{\beta_i} + Q_{i\text{ref}} \right) - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0$$

$$i = 1, \dots, r \quad (12)$$

$$Q_i - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0$$

$$i = r+1, \dots, n-m-1 \quad (13)$$

2.3 计及全运行方式的综合调差系数

综合调差系数的求解以电网潮流计算为基础开展，具体方法如下。

首先，根据潮流计算模型和历史运行数据及未来负荷预测数据进行电网潮流计算各发电机组综合调差系数，得到与调差系数相对应的各变电站母线电压连续变化曲线，提取电压曲线特征，建立变电站母线电压与发电机组综合调差系数的对应关系。然后，以电网电压运行要求为限制，根据电网各变电站母线电压与发电机组综合调差系数的对应关系反推出调差系数合理整定范围，最终制定该地区发电机组综合调差系数整定方案，以保证在电网全部运行方式下，各变电站母

线电压符合电网运行要求。

3 应用情况

根据吉林省各地区电网内电源、电网结构和无功负荷情况对吉林省电网进行分区。将吉林省电网分为长春、吉林、延边、辽四（辽源、四平）、松白（松原、白城）和通白（通化、白山）六个地区电网，各分区电网调差系数分别整定。

采用所提出的调差系数计算方法，建立分区域电网潮流计算模型，读入实测运行数据、未来预测数据及电网运行各指标限制。设定发电机励磁系统综合调差系数调整范围（2%~10%），对于某一调差系数值，根据电网全部运行方式实测运行数据进行潮流计算，如在全部运行方式下电网运行各指标满足运行要求，则此调差系数为合理值；若在任一电网运行方式下不满足运行要求，则此调差系数为不可行值。

将全部调差系数合理值作为调差系数合理整定范围，即当发电机组励磁系统调差系数在合理整定范围内取值时，可以保证在全部运行方式下电网运行各指标满足运行要求。

3.1 计算结果

将上述方法应用于吉林省电网，基于2009~2010年吉林电网实测运行数据和未来负荷预测数据，对并入220 kV以上电网的全部省调直调发电机励磁系统调差系数进行重新整定。

根据该方法对各区域电网调差系数进行合理整定，结果如表1所示。

表1 具体整定结果

地区	整定前励磁综合 调差系数(%)	整定后区域 调差系数(%)	综合 调差系数(%)
长春电网	3.7~7.3	2~4	3
吉林电网	6.3~8.4	2~5.3	4
延边电网	4.5~6.5	2~4.5	3
辽四电网	2.5~6.8	2~5.6	4
松白电网	2.4~7.1	2~5.2	3
通白电网	6.0~7.9	2~5.2	4

对于经长距离输电线路送至负荷中心的发电厂，其调差系数可作适当微调，以增加其对电网

电压调节能力。

3.2 现场整定效果

2011年10月吉林省调完成了全省各发电机组综合调差系数重新整定工作。重新整定后，全省各发电机组无功分配合理，无功潮流得到优化，网损降低，220 kV及以上电压等级系统运行电压波动明显减小。具体结果如下。

(1) 电压波动情况

图2为长春地区枢纽变电站之一的北郊变电站220 kV母线电压情况。由图2可见，应用调差系数新方案后，母线电压波动范围由7 kV（226~233 kV）降低至2.8 kV（228.9~231.2 kV），变电站母线电压波动明显减小。其他主要变电站电压波动情况也类似。

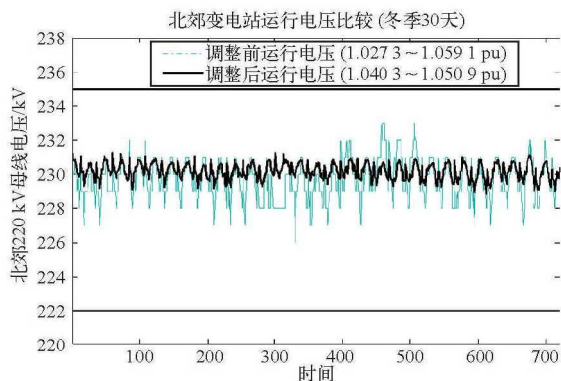


图2 北郊变电站电压比较

可见，通过对长春地区机组励磁系统调差系数的重新整定，该地区各枢纽变电站母线电压波动指标较调整前明显减小。同时也验证了通过对发电机励磁系统调差系数重新整定，充分挖掘了发电机的电压无功调节能力，当电网无功负荷变化时，发电机提供了更多的无功支持，因此区域电网各枢纽变电站电压波动明显减小。

(2) 无功波动情况

图3为发电机励磁系统调差系数调整前后长春地区各发电机无功功率范围对比。图4为调整前后全省发电机无功功率总和对比。

由图3、图4可见，调整前，当电网运行方式变化时，由调度运行人员人为调节部分发电机无功功率，由于认为干预主要依靠经验进行，造成

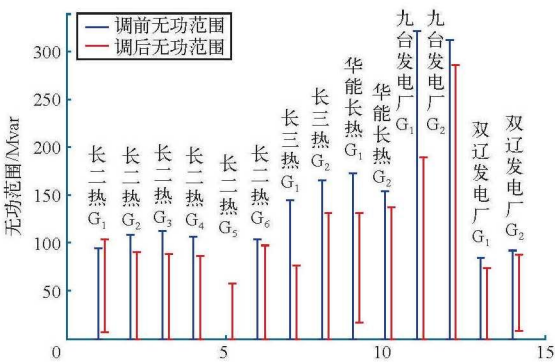


图3 长春地区各发电机无功功率范围对比

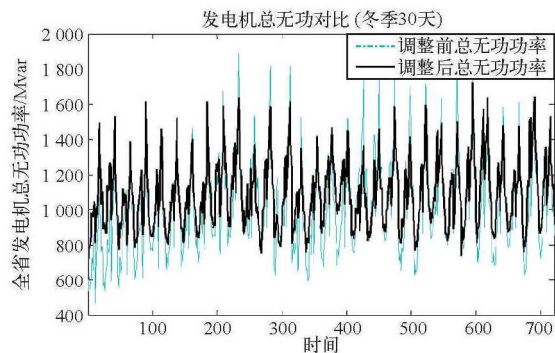


图4 全省发电机无功功率总和对比

了各发电机之间无功不合理窜动，不仅增加了系统有功网损，而且使各发电机无功功率增加，使发电机更容易达到发电极限，影响发电机有功功率。

通过合理整定发电机励磁系统调差系数，当电网运行方式变化时，各发电机共同承担无功负荷，避免了无功功率不合理窜动，提高了电网电压水平。

(3) 人工调整情况

人工调整对比情况如表2所示。可见，通过对发电机励磁系统调差系数合理整定，充分挖掘发电机连续自动的电压无功调节能力，可以大大减少运行人员对发电机无功电压调节的干预次数，提高了电网自动化程度，也避免了由于运行人员操作不当对电网运行的影响。

表2 人工调整次数对比

	调整前/次	调整后/次
夏季	209	13
冬季	245	17

(4) 有功网损

对吉林省发电机励磁系统调差系数全部重新

整定后,以吉林电网2010年度一次网损电量累计为121 041万kW·h为例,可节约电能907.8万kW·h,按每度电0.5元计算,可减耗453.9万元。

通过合理整定调差系数,可以合理设置发电机无功调节特性,电网运行电压水平提高,不合理的无功窜动减小,电网有功损耗降低。

4 调差系数对功角稳定性影响分析

功角稳定性是电力系统安全稳定运行的基本保证,下面将着重分析调差系数对功角稳定性的影响,以定性得出调差系数与系统功角稳定的关系。

4.1 理论分析

分析模型如图5所示,对于具有自动励磁调节器的隐极式同步发电机,功角特性可表示为

$$P_G = \frac{E'_q U_H}{X'_d + X_T} \sin \delta + \frac{U_H^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta \quad (14)$$

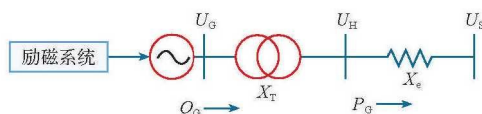


图5 单机无穷大系统示意图

由图1可知,当发电机变压器组高压侧电压发生变化时,由于发电机励磁调节器的作用,发电机的励磁电流将按整定的发电机组综合调差系数进行调节,改变发电机的无功输出,维持发电机变压器组高压侧电压稳定。同时,这也就改变了发电机的 E'_q ,如式(14)所示, P_G 也随之变化,通过发电机励磁调节器的连续调整,提高了发电机组的稳定性,相当于增加了系统稳定区。

图6为不同调差系数下的同步发电机功角特性曲线图,其中 $\beta_1 > \beta_2 > \beta_3$ 。从图6中可以看出,发电机组综合调差系数较小的情况,机组稳定水平较高。但其值的变化范围还要受机组的无功出力变化速率及系统电压变化情况综合考虑来确定。合理设定机组的附加调差系数将在一定程度上提高系统的稳定性,减少机组的出力限制。对保证电网安全、经济和优质运行具有重要作用。

下面将通过仿真计算验证结论的正确性。

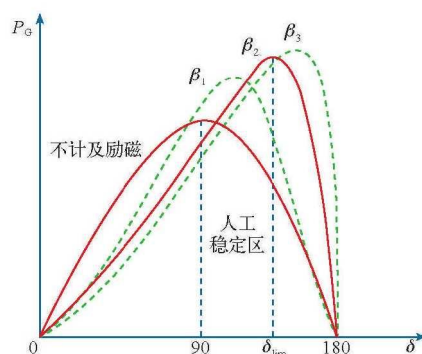


图6 同步发电机功角特性

4.2 仿真算例

以吉林延边地区电网(延吉500 kV变电站投产前)为例进行分析,图7为延边地区电网结构图,此网的发电厂包括珲春发电厂(2×330 MW)、延吉热发电厂(2×200 MW)两座主力火力发电厂。网内的过剩电力经长度140 km的敦西甲乙线及平延线三条220 kV线路送入主网,是典型的长距离输电系统,电网的安全稳定问题一直比较突出,并且该网存在着较为严重的暂态稳定问题。为此,该地区配置了区域安全稳定系统,以保证电网的安全稳定运行。调整机组调差系数,增强系统运行稳定性后,可以减少稳控装置的运行风险,进一步提高电网的安全稳定运行水平。因此,下面采用PSASP6.28仿真分析调差系数对机组暂态稳定性的影响。

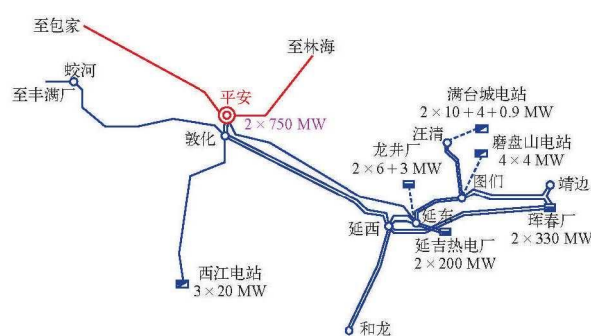


图7 延边地区电网示意图

而且由于此电网存在暂态稳定问题,机组出力受限问题也比较严重,因此,采用暂态稳定仿真来分析调差系数对电网稳定的影响。

为了便于对比分析,取珲春发电厂、延吉热电厂机组的综合调差6及重新整定后的综合调差3

进行对比仿真, 来分析附加调差系数对电网稳定运行的影响。在仿真中假定敦西甲乙线敦化变电站侧跨线故障。

从图8、图9中可以看出, 不同附加调差系数下, 在相同故障情况下, 机组的功角稳定性差别很大。选用3的综合调差系数同选用6的相比, 机组的功角摆动幅度将明显减少, 更有利于系统的稳定, 因此选择合理的调差系数将更有利于机组的稳定运行。特别是长距离输电的机组群, 调差系数的合理调整将有利于改善出力受限的情况, 提高机组的负荷率。

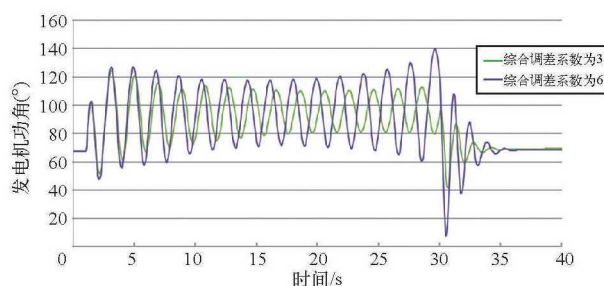


图8 珲春厂发电机功角曲线

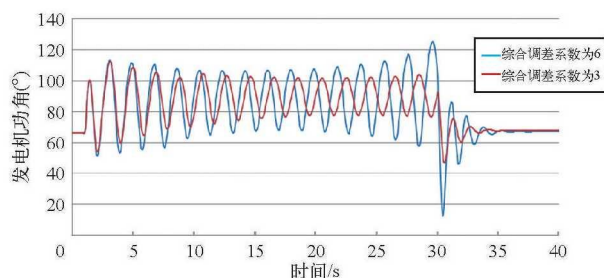


图9 延吉热电厂发电机功角曲线

5 结束语

给出了机组励磁系统调差系数的整定方法, 对于调差系数对机组功角稳定的影响进行了理论分析及仿真验证, 从文中分析可以得出。

1) 调差系数应根据分区平衡的特点分区整定。

2) 合理整定调差系数可以减少系统电压及无功波动, 减少发电厂人工调整次数, 降低网损。

3) 调差系数对机组的功角稳定性有一定的影响, 合理地选择调差系数可提高系统的稳定性。

参考文献

- [1] 史扬, 赵焱, 徐正龙, 等. 一种发电机无功调差系数测定方法及分析 [J]. 华北电力技术, 2009 (11): 1-3.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 沈杰, 房鑫炎. 宝钢电厂0号与3号发电机无功分配分析 [J]. 电力自动化设备, 2002, 22 (9): 75-77.
- [5] 王利永. 发电机励磁系统中调差特性分析 [J]. 天津电力技术, 2007 (4): 32-33.
- [6] 安军, 穆钢, 郑太一, 等. 改善电网电压水平的发电机励磁系统调差系数优化策略 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (23): 97-101.
- [7] 王明星, 穆钢, 安军, 等. 电力系统多时段多目标的发电机励磁系统调差系数优化整定 [J]. 电网技术, 2013, 37 (11): 3178-3183.
- [8] 智勇, 拜润卿, 梁福波, 等. 计及发电机励磁调差系数的潮流计算方法分析 [J]. 现代电力, 2014, 31 (5): 32-36.
- [9] 吴跨宇, 竺士章. 发电机励磁系统调差对PSS参数整定的影响与对策 [J]. 电力自动化设备, 2010, 30 (9): 67-71.
- [10] 张俊峰, 李鹏, 苏寅生, 等. 励磁系统调差系数优化整定存在的风险分析 [J]. 电力系统自动化, 2015 (20): 141-145, 151.
- [11] 杨桂钟, 林因, 董树锋. 大电网发电机组电压调差系数优化和整定方法 [J]. 能源工程, 2015 (3): 25-29.

(收稿日期: 2016-12-27) **EA**