

The Influence of Excitation System Differential Coefficient on Reactive Power Distribution of Parallel Operation Generator Sets

Haibo Liu

Wanmipo Hydropower Plant, Wuling Electric Power Co., Ltd., Xiangxi, Hunan, 416000, China

Abstract

As an important reactive power source in the power system, droop coefficient of the generator excitation system is a key parameter reflecting the reactive power-voltage characteristics. Differences in the value of the droop coefficient can significantly affect the grid voltage level and reactive power distribution, which in turn has a direct impact on the safe and stable operation of the power system. Reasonable optimization of the droop coefficient of the generator excitation system has significant engineering application value. In this paper, through an in-depth analysis of the influence mechanism of different differential modulation coefficient settings on the reactive power distribution of generator sets running in parallel, a negative modulation optimization tuning method suitable for unit wiring units is proposed, which provides a technical reference for improving the voltage stability and reactive power balance distribution of power grid.

Keywords

excitation system; droop coefficient; parallel operation; unit wiring; reactive power distribution

励磁系统调差系数对并列运行发电机组无功分配的影响

刘海波

五凌电力有限公司碗米坡水电站, 中国·湖南湘西 416000

摘要

在电力系统中发电机作为重要的无功电源, 其励磁系统的调差系数是反映无功-电压特性的关键参数。调差系数的取值差异会显著影响电网电压水平和无功功率分布, 进而对电力系统的安全稳定运行产生直接影响, 合理优化发电机励磁系统的调差系数具有显著的工程应用价值。本文通过深入分析不同调差系数设置对并列运行发电机组无功分配的影响机制, 提出适用于单元接线机组的负调差优化整定方法, 为提升电网电压稳定性和无功均衡分配提供了技术参考。

关键词

励磁系统; 调差系数; 并列运行; 单元接线; 无功分配

1 引言

在电力系统中发电机无功功率输出与电网电压紧密关联, 合理分配无功功率是保障并列运行发电机稳定运行的关键因素。当无功功率分配失衡时, 会出现单台发电机承担过量无功, 致使其端电压异常攀升, 而其余机组端电压下降, 这将严重威胁电网整体电压稳定性。此外, 无功分配不均还会引发一系列负面效应: 一方面部分发电机会因励磁电流过大而处于过载状态, 使得铜损与铁损显著增加; 另一方面机组间会产生有害环流, 引发设备异常振动与过热现象, 甚至危及设备安全运行。科学合理的无功功率分配机制, 能有效

增强电力系统的抗干扰能力, 大幅降低低频振荡、失步等事故的发生概率。无功功率的均衡分配是确保并列运行发电机安全、稳定运行的核心保障。

2 发电机励磁系统基本概念及其作用

2.1 励磁系统基本概念

在发电机工作过程中, 转子绕组通入直流电后产生旋转磁场, 该旋转磁场与静止的定子绕组相对运动, 从而在定子绕组中感应出交流电动势。同步发电机的励磁系统主要包括两个功能单元: 励磁功率单元和励磁调节器。励磁功率单元的主要作用是给发电机转子提供所需的直流励磁电流, 励磁调节器则依据系统输入信号和预先设定的控制算法对励磁功率单元的输出进行实时调节。励磁自动控制系统为完整的闭环反馈回路, 由励磁调节装置、励磁功率单元和发电机

【作者简介】刘海波(2002-), 男, 中国湖南长沙人, 本科, 助理工程师, 从事水电厂电气维检研究。

本体共同组成。

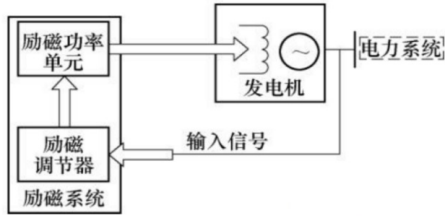


图1 励磁系统的基本组成

2.2 励磁系统的基本作用

在电力系统运行过程中，无功电流会因负载的随机性和波动性而发生变化，这种无功电流的波动将引起发电机电动势与机端电压之间产生偏差。若保持励磁电流不变，随着无功负载的增加，会导致发电机的机端电压下降。为了确保机端电压维持在合理的运行范围内，必须通过励磁系统对机端电压变化进行实时监测，并相应调整励磁电流，以维持发电机机端电压的稳定。励磁系统主要承担以下基本功能：

- (1) 依据发电机负荷变化情况调节励磁电流；
- (2) 协调并列运行发电机之间的无功功率分配；
- (3) 提高发电机并列运行时的静态和暂态稳定性能；
- (4) 在发电机发生内部故障时执行灭磁操作；
- (5) 按照运行需求对发电机实施最大励磁和最小励磁限制。

3 发电机励磁系统调差系数

3.1 发电机励磁系统调差系数定义

多台发电机在母线上并列运行时，各并联发电机间承担的无功功率的大小取决于各发电机励磁系统的调差特性，即发电机机端电压 U_t 和无功电流 I_Q 的关系。定义调差系数^[1]

$$\beta = -\frac{\Delta U_{t^*}}{\Delta I_{Q^*}} \quad (2-1)$$

式中 ΔU_{t^*} 为发电机机端电压变化量与额定电压之比，即 $\Delta U_{t^*} = \Delta U_t / U_{tN}$ ；

ΔI_{Q^*} 为发电机无功电流变化量与额定电流之比，即 $\Delta I_{Q^*} = \Delta I_Q / I_{QN}$ 。

3.2 励磁系统调差系数的意义

根据励磁系统调差系数的定义，可将其分为正调差、负调差和零调差三种类型。无功功率与无功电流成正比，故可得图2三种调差系数对应的电压与无功功率之间的特性曲线。

当调差系数 β 小于零时，无功功率增加时机端电压上升（电压增量为正），该特性称为负调差特性，简称负调差；

当调差系数 β 大于零时，无功功率增加时机端电压下降（电压增量为负），该特性称为正调差特性，简称正调差；

当调差系数 β 等于零时，无功功率的变化不会影响电压（电压保持恒定不变），该特性称为零调差特性，简称零调差。

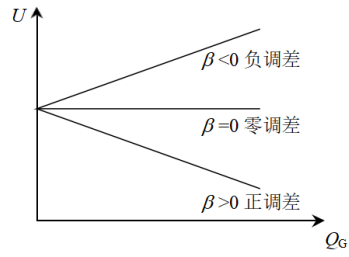


图2 励磁系统调差特性曲线

如图3所示，将发电机组的调差系数分别调整为 b_1 、 b_2 ，关系式如式(2-2)、(2-3)所示。

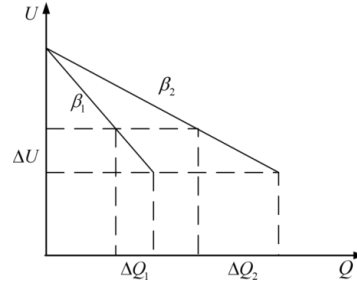


图3 调差系数对电压-无功的影响

$$\beta_1 = \frac{\Delta U}{\Delta Q_1} \quad (2-2)$$

$$\beta_2 = \frac{\Delta U}{\Delta Q_2} \quad (2-3)$$

式中 ΔU 为发电机机端电压变化量；

ΔQ_1 表示当励磁系统调差系数为 b_1 时，发电机机端电压变化 ΔU 所对应的发电机无功功率变化量；

ΔQ_2 表示当励磁系统调差系数为 b_2 时，发电机机端电压变化 ΔU 所对应的发电机无功功率变化量。

当发电机机端电压变化量 ΔU 保持恒定时，若励磁系统调差系数 b_1 大于励磁系统调差系数 b_2 ，则发电机无功功率变化量 ΔQ_1 小于发电机无功功率变化量 ΔQ_2 ，这表明在相同电压波动条件下，发电机无功功率的波动幅度会随着调差系数的降低而增大。

调差系数设置得偏大，在电网运行时当发电机输出的无功功率出现细微的波动时，会导致运行中电压波动范围过大，影响电压质量，进而增加电网运行风险。调差系数设置得偏小，在电网运行时当电压出现细微的波动时，会导致发电机输出的无功功率的波动比较大。所以在电力系统中，必须对励磁系统的调差系数进行合理的调节^[2]

4 机组的调差特性对无功功率分配的影响

以单元接线为例，对于一个发电单元，其总调差系数（ γ ）为发电机励磁系统调差系数（ β ）与主变压器短路阻抗（ X_d ）之和。由于受主变固有短路阻抗的影响，主变高压侧的并列运行母线电压偏低。为补偿主变无功电流造成的压降，发电机励磁系统调差系数宜采用负调差特性，但补

偿主变压器压降后实际反映至主变高压侧的调节特性为正调差特性^[1]。当调差系数 β 小于零时,随着系统无功负荷增加,发电机会通过提高励磁电流来维持主变压器高压侧系统电压的稳定。经发电机励磁系统补偿主变压器压降后实际反映至主变高压侧的调差系数也不会太大,对系统的无功负荷波动反应更敏感,该特性使系统能够快速响应无功负荷的变化,表现出良好的电压调节性能。在多台发电机并列运行的工况下,母线电压水平及各机组间的无功功率分配主要受机组电压调节特性的影响,具体表现为励磁系统调差系数的设定。无功调差控制的核心目标在于实现并列机组间的无功功率均衡分配,当系统电压发生波动时,该控制策略能够确保并联在同一母线上的各机组无功功率变化保持同步,从而防止个别机组的外特性与其他机组产生过大差异出现“抢无功”现象。

5 并列运行发电机在不同发电机励磁系统调差特征下的运行工况

当多台发电机组并联运行在同一母线上时,系统总无功功率将由所有并列运行的发电机组共同承担,各机组调差特性的差异会直接影响无功功率的分配情况,以下以单元接线为例对具有不同励磁系统调差特性的发电机组在并列运行时的工况进行深入分析。

5.1 无差调节机组的并列运行 ($\gamma_1 = \gamma_2 = 0$)

当多台具有无差调节特性的发电机并列运行时,基于对励磁系统调差特性的理论分析可以得出,这些发电机的励磁特性曲线要么完全重合,要么相互平行且不相交。这种多台发电机无差调节特性配置会导致并列运行的发电机之间无法形成有效的无功功率分配机制,进而引发无功功率在机组间随机分配的动态的不稳定现象,因此这种运行方式是不允许的。

5.2 有差调节机组与无差调节机组的并列运行 ($\gamma_1 \neq 0, \gamma_2 = 0$)

当一台有差调节特性的发电机与一台无差调节特性的发电机并列运行时,若系统无功负荷出现波动,为了维持母线电压的稳定,无差调节特性的发电机将承担全部的无功功率变化,虽然这种运行方式在理论上能够维持发电机组间的稳定运行,但容易引起无差调节特性的发电机过载,因此这种运行方式是不被采用的。

5.3 有差调节机组与有差调节机组的并列运行 ($\gamma_1 \neq 0, \gamma_2 \neq 0$)

5.3.1 两台负调差机组并列运行 ($\gamma_1 < 0, \gamma_2 < 0$)

当多台具有负调差特性的发电机并列运行时,当并联点处的母线电压波动,以母线电压升高为例进行分析。这些机组将同时增加无功功率输出,并联点处的母线电压将会进一步升高,无法建立新的稳态平衡点。这种正反馈过程若持续发展,将导致系统母线电压越限,因此必须避免采用这种

运行方式。

5.3.2 正调差机组和负调差机组并列运行 ($\gamma_1 > 0, \gamma_2 < 0$)

当两台发电机并列运行在同一母线上时,如果其中一台发电机采用正调差特性而另一台发电机采用负调差特性。通过对励磁系统调差特性曲线的分析,尽管两条曲线存在交点,但在并联母线电压发生波动的情况下,以母线电压下降为例,具有正调差特性的发电机将增加无功功率输出,而具有负调差特性的发电机则会减少无功功率输出。这种相反的控制响应会导致系统无法在新的工作点达到稳定平衡,反而会加剧电压波动,最终导致并联机组之间的运行失稳,这种正负调差机组并列运行的配置也是不合理的。

5.3.3 两台正调差机组并列运行 ($\gamma_1 > 0, \gamma_2 > 0$)

当多台具有正调差特性的发电机并列运行时,当并联点处的母线电压波动,以母线电压升高为例进行分析。这些并列运行的正调差特性的发电机将自动减少无功功率输出。该调节机制能够使母线电压稳定在一个新的平衡点,从而确保并联机组的稳定运行。由此可见,要实现并联机组的稳定运行,所有并列运行的机组在并联节点处必须具备正调差特性。

6 励磁系统调差系数整定原则

由以上分析可得出:

(1) 并联点处母线电压变化时,并联发电机组间的无功分配与电压偏差成正比,与其励磁系统调差系数的大小成反比,并且发电机励磁系统调差系数小的机组承担更多的无功^[4]。

(2) 并联于同一母线上运行的发电机组,在并联点处必须都为正调差特性。

发电机无功调差有两方面作用:首先,确保并列运行机组在稳态工况下按比例分配无功功率;其次,在系统电压波动时,使各机组的无功出力增量按预定比例调节分配。对于单元接线的发电机组,由于升压变压器本身具有较大的自然调差系数(主要由变压器电抗决定),为了提高发电机组对系统的电压(无功)支撑能力,通常将励磁调节器中的无功调差系数设置为负值,这种负调差特性应基本一致^[5]。

参考文献

- [1] 张俊峰.发电厂励磁系统现场试验[M].北京:中国电力出版社,2016:2-3.
- [2] 高珮文.发电机励磁调差系数对电网的影响及其优化整定研究[D].陕西:西安工程大学电子信息学院,2023:12.
- [3] 李嘉敏,张乐安,赵鹏,等.电压调差系数对秦山核电机组间无功出力分配的影响研究[J].电站系统工程.2018,34(1):56-58,61.
- [4] 王明星.提高电网电压水平的发电机励磁系统调差系数优化整定研究[D].吉林:东北电力大学电气工程学院,2014:21.
- [5] 国家能源局.防止电力生产事故的二十五项重点要求及编制释义[S].北京:中国电力出版社,2023:200.