

# 基于闭环控制的独立电力系统低频减载策略

邹 晴, 林湘宁, 翁汉珩

(华中科技大学电力工程系, 湖北省武汉市 430074)

**摘要:**设计了一种基于比例-积分-微分(PID)控制思想的电力系统频率紧急控制策略。通过检测独立电力系统相关开关量的变化,识别发电机退出或出现与大电网解列等严重事故,根据所测量的退出电源容量迅速启动低频减载(UFLS)装置的紧急启动轮,以尽快抑制频率的急剧下降。在后续的调节过程中,引入 PID 闭环控制策略对频率进行跟踪控制,并引入粗调轮和细调轮的概念以应对频率的不同变化阶段。最后通过 EMTDC 仿真试验验证了所提出的方法有效性。

**关键词:**低频减载;紧急启动轮;粗调轮;细调轮;PID 闭环控制

**中图分类号:** TM761

## 0 引言

低频自动减负荷是提高电网安全性和可靠性的重要措施之一。好的低频切负荷方案应快速准确动作,避免误动作和多余的动作,并且应在保证恢复系统稳定性和不越过系统安全运行频率点的前提下切负荷量最小。基于近 50 年来减负荷的研究,可将低频减载(UFLS)方案大致分为以下 4 类:传统法、半适应法、自适应法和计算机辅助算法。

计算机辅助算法需要大规模采集数据信息,且算法复杂,目前在 UFLS 装置中极少使用。传统法、半适应法和自适应法都是采用逐次逼近式的 UFLS 方案,直接根据母线电压的频率变化调整负荷,为了避免系统振荡以及其他原因造成的频率下降,需要人为地增加延时,这就明显削弱了装置的快速性,而且逐次逼近的方法在任何功率缺额下都逐轮切除同样的负荷,不能适应多变的故障情况。通过研究发现,少切和过切负荷的现象时有发生,频率恢复曲线也不理想<sup>[1]</sup>。

随着分布式发电系统的发展,独立电力系统的运行和控制问题日益受到重视。实际上,独立电力系统既包括风力发电、太阳能发电等分布式电力系统,又包括本身具有区域性电厂和系统电网解列后能形成孤立电力系统的重要供电小区。

与大系统大电网相比,独立电力系统有其自身特点:①独立电力系统中机组和负荷相对集中,便于对发电集中统一管理,为在全局层次上的优化控制提供了现实基础;②独立电力系统的发电功率、机组投退可以实时测量,通过记录扰动发生前各机组出力或联络线功率等数据,可以实时识别出当前的

功率缺额<sup>[2]</sup>。所以有必要针对独立电力系统提出一套专门的 UFLS 方案。本文重新定义了轮的概念,提出了按功率缺额减负荷和比例-积分-微分(PID)闭环控制相结合的频率控制策略,使得方案的智能性和可控性有了较大提高。

## 1 粗调轮和细调轮的概念

为了适应不同的功率缺额,UFLS 装置每路断路器控制的负荷量应尽可能细化,但实际 UFLS 装置能够控制的断路器路数有限<sup>[3]</sup>。出于这 2 方面的考虑,本文提出粗调轮和细调轮的概念。设接入 UFLS 装置的可切负荷总的有功功率为  $P_U$ ,UFLS 装置能够控制的总路数为  $N$ ,细调轮的路数为  $n$ ,则粗调轮每轮所切负荷量  $P_B = P_U / (N - n + 1)$ ,细调轮每轮所切负荷量  $P_S = P_B / n$ 。当系统功率缺额很大时,启用粗调轮,尽快切除功率缺额;当功率缺额很小时,启用细调轮,避免引起频率超调。这样的安排,既考虑了 UFLS 路数上的限制,又满足了系统对不同情况下切负荷量的要求。细调轮的路数不宜取得过多,建议  $1 < n < N/2$ 。

在划分粗调轮和细调轮时,应遵循负荷重要性优先原则,即将重要性相同的负荷尽量放在一起,然后按负荷重要性高低分配给 UFLS 控制的每路断路器,在减载的过程中,按照重要性从低到高依次切负荷。

## 2 紧急启动轮的启用

在独立电力系统中,只有当出现发电机退出或者重要供电小区与大系统解列的情况下,才会出现巨大的有功缺额,缺额可能达到总负荷的一半甚至更多,引起系统频率急剧下降,为此提出紧急启动轮的概念。

在系统正常运行时,实时监测发电机出线以及系统联络线的开关及其功率流动。当检测到有发电机退出或与大电网解列的大扰动时,测量退出的发电功率,得到有功缺额  $P_q$ ,作为频率调节的依据。当功率缺额较大时,频率将急剧下降到启动频率点  $f_1$  ( $f_1$  为 49.0 Hz~49.5 Hz,本文取 49.2 Hz),此时,启用紧急启动轮,按  $P_q$  的一定比例切负荷<sup>[4]</sup>。

为了防止切负荷过快而引起频率超调,又考虑到频率下降到一定程度,发电机的调速系统才开始动作,调整各发电机出力,释放备用容量<sup>[5]</sup>,紧急启动轮的切负荷量应小于  $P_q$ ;同时,为了避免出现频率崩溃的危险,紧急启动轮应能切除大部分功率缺额,否则频率的急剧下降得不到有效遏制,为此,紧急启动轮的切负荷量应不小于 50%  $P_q$ 。综合上述因素考虑,将  $P_q$  乘以一个百分数  $K_q$ ,作为紧急启动轮的切负荷量。由于紧急启动轮是一种缓解故障的手段,精确减负荷不是其主要目的,所以  $K_q$  可以在 50%~70% 取值,由用户根据系统结构和减载要求自行整定。在实际应用中,将重要性最低的粗调轮按最接近  $K_q P_q$  的原则,整合在一起作为启动轮的最终切负荷量,亦即:启动轮的启动=检测到故障+检测到频率急剧下降到  $f_1$ +切最接近  $K_q P_q$  的粗调轮数。

### 3 PID 频率闭环控制

在电力系统中,有功缺额既导致频率的下降,又促使发电机备用容量的释放。由于发电机备用的释放需要一个过程,如何在这对矛盾中取得平衡并使频率恢复曲线最佳,是好的 UFLS 方案的重要标志<sup>[3]</sup>。

在独立电力系统中,紧急启动轮的使用可以对由发电机退出以及系统解列事故引起的巨大功率缺额进行有效抑制,为后续轮的调节争取时间。其他原因引起的功率缺额不会导致频率的急剧下降,也为频率调节留有一定的时间。针对系统功率缺额不大的情况,引入自动控制领域中的 PID 闭环控制策略,实时跟踪系统频率的变化并采取相应的措施,在抑制频率下降和释放系统备用容量之间取得平衡,并对频率恢复曲线进行优化。

针对电力系统自身的特点,对 PID 控制进行相应的改进,其闭环控制框图如图 1 所示。

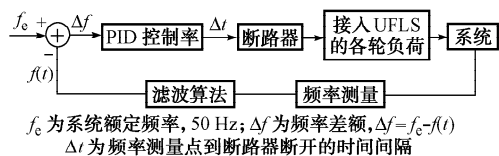


图 1 PID 控制框图

Fig. 1 Block diagram of PID control

$\Delta t$  具体公式如下:

$$\Delta t = \frac{1}{K_P \Delta f + \frac{K_I}{T_I} \int_{t_n - T_I}^{t_n} \Delta f dt + K_D \frac{d\Delta f}{dt}} \quad (1)$$

式中:  $K_P$  为比例常数;  $K_I$  为积分常数;  $K_D$  为微分常数;  $T_I$  为积分时间;  $t_n$  为 UFLS 装置的当前采样时刻;  $\Delta f$  反映了故障的严重程度,  $\Delta f$  越大, 事故越严重, 切负荷动作越快;  $\frac{1}{T_I} \int_{t_n - T_I}^{t_n} \Delta f dt$  反映了频率降低的时间累积效应, 其大小表征了备用容量的释放程度, 越大则待释放的备用容量越少, 切负荷的速度也应越快;  $d\Delta f/dt$  反映了当前频率下有功缺额的大小, 越大则有功缺额越大, 切负荷动作越快。

在上述参数中,  $d\Delta f/dt$  尤其重要。根据简化的系统频率响应模型  $d\Delta f/dt = 25P_q/H$ ,  $d\Delta f/dt$  与系统的功率缺额成比例, 其中  $P_q$  为基于系统基准值的标么值,  $H$  为系统惯性常数<sup>[6]</sup>。为此, 对  $d\Delta f/dt$  设置阈值  $F_f$  作为启动粗调轮与细调轮的标志, 当  $d\Delta f/dt > F_f$  ( $F_f > 0$ ) 时启用粗调轮以尽快切除功率缺额, 当  $d\Delta f/dt < F_f$  时启用细调轮, 以避免过切并优化频率恢复曲线。

以上讨论的是频率下降的情况。在频率上升过程中, 原有判据仍有值得改进的余地。当  $d\Delta f/dt < 0$  时, 系统频率开始恢复。现有方案在频率上升阶段基本轮不再动作, 当出现频率悬停时延时 10 s~20 s 启用备用轮。当  $d\Delta f/dt < 0$  时, 如果  $|d\Delta f/dt|$  过大, 即频率上升过快时, 很有可能出现过切; 当  $|d\Delta f/dt|$  过小, 即频率上升过慢时, 极有可能需要继续切负荷。仿真也表明, 当  $d\Delta f/dt$  小于某个负阈值  $F_{rf}$ , 即  $d\Delta f/dt < F_{rf} < 0$  时, 频率将出现超调并超过 51 Hz, 这是系统运行所不允许的; 当  $d\Delta f/dt$  大于某个负阈值  $F_{rs}$ , 即  $F_{rs} < d\Delta f/dt < 0$  时, 频率会在一个较低水平悬停, 基本轮和紧急轮都无法动作, 严重影响电能质量, 甚至对发电和用电设备造成损害。

针对现有方案在频率上升阶段的控制死区, 利用 0,  $F_{rf}$ ,  $F_{rs}$  这 3 个阈值对频率的恢复阶段进行跟踪控制。基本原则是: 在频率上升阶段, 一律启用细调轮, 避免由于一轮投、切负荷过多造成频率随之不停下降与上升, 同时优化频率恢复曲线。下面分 3 种情况进行讨论。

1)  $d\Delta f/dt < F_{rf} < 0$ : 频率上升过快。为了防止频率超调, 必须投入细调轮, 由于此时  $|d\Delta f/dt|$  很大且为负数, 当其在公式中占主导时, 有可能使得式(1)中的  $\Delta t$  变负, 为此将公式改动如下:

$$\Delta t = \frac{1}{\left[ K_P \Delta f + \frac{K_I}{T_I} \int_{t_n-T_I}^{t_n} \Delta f dt + K_D \frac{d\Delta f}{dt} \right]} \quad (2)$$

根据式(2),  $|d\Delta f/dt|$  越大, 频率上升越快,  $\Delta t$  就越小, 即负荷投入的时间间隔应相对较短; 对应地,  $\frac{1}{T_I} \int_{t_n-T_I}^{t_n} \Delta f dt$  和  $\Delta f$  越大, 表明当前频率距离 50 Hz 越远, 超调的可能性越小。此时计算得到  $\Delta t$  相对较大, 表明负荷投入的时间可以相对较长。采用以上处理后, 将有效避免现有方案中频率大幅度超调现象的发生。

2)  $F_{rs} < d\Delta f/dt < 0$ : 频率恢复过慢甚至频率在较低水平悬停。当出现以上情况时, 现有方案没有相应的切负荷动作, 出现控制死区。为避免这种情况出现, 在这个阶段切细调轮以加快频率的恢复速度。考虑到系统可能还有备用容量没有释放, 而备用容量的释放需要一个过程, 为此, 可以考虑加大各轮切负荷动作之间的间隔, 在式(1)的基础上乘以一个大于 1 的系数  $K$ , 如式(3)所示, 作为这个阶段切负荷的依据。

$$\Delta t = \frac{K}{\left[ K_P \Delta f + \frac{K_I}{T_I} \int_{t_n-T_I}^{t_n} \Delta f dt + K_D \frac{d\Delta f}{dt} \right]} \quad (3)$$

3)  $F_{rl} < d\Delta f/dt < F_{rs}$ : 频率恢复速率合适。在这个阶段, UFLS 不动作, 等待频率进一步恢复。

应该指出, 在本方案中, 各个参数  $K_P, K_I, K_D, K, F_f, F_{rs}, F_{rl}$  的大小与系统规模、电源和负荷特性密切相关, 目前尚不能从理论上给出其整定原则, 可根据运行经验结合仿真试验进行整定。实际上, 上述参数也不一定需要精确整定, 可以说, 如果这些参数能整定到与系统的特性完全匹配, 就能取得最佳的控制效果, 而在很宽的范围内调节时, 即使控制效果达不到最优, 也将优于传统方案。如何对上述参数进行优化将是我们的下一步的工作。目前, 还无法提出关于上述各个参数的严格证明过程, 通过大量仿真,  $K_P$  取 0.5,  $K_I$  取 0.5,  $K_D$  取 1.0~2.5,  $K$  取 5~10,  $F_{rl} \leq -0.6$ ,  $F_{rs}$  取  $-0.05 \sim -0.30$ , 能获得很好的控制效果。

## 4 仿真实验

EMTDC (ElectroMagnetic Transient in DC System) 是世界上公认的电力系统电磁暂态和机电暂态仿真软件, 为了验证频率 PID 闭环控制策略在独立电力系统中应用的优越性, 可考虑利用 EMTDC 建模。本文根据不同的独立电力系统的负荷组成和运行参数建立了不同的仿真模型, 对不同功率缺额下的控制过程进行仿真, 比较了原有方案

和新方案的控制效果。

一个典型独立电力系统的仿真模型如图 2 所示<sup>[7]</sup>。

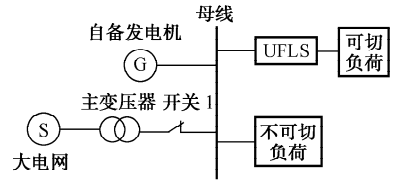


图2 重要供电小区仿真模型  
Fig. 2 Simulation model of important power supply region

在一次系统建模中, 考虑小区自带发电机  $G$  和大电网  $S$  并列运行对该小区的负荷供电, 其中发电机用 EMTDC 中的带原动机和励磁机的同步发电机模型模拟, 原动机既可以是汽轮机模型 (steam-turbine), 也可以是水轮机模型 (hydro turbine), 在仿真中分别予以验证。系统用带恒定内阻抗的电势源模拟。

负荷的有功功率与频率的关系式如下:

$$P_D = a_0 P_{DN} + a_1 P_{DN} \left( \frac{f}{f_N} \right) + a_2 P_{DN} \left( \frac{f}{f_N} \right)^2 + a_3 P_{DN} \left( \frac{f}{f_N} \right)^3 \quad (4)$$

式中:  $P_D$  为频率等于  $f$  时整个系统的有功负荷;  $P_{DN}$  为频率等于额定值  $f_N$  时整个系统的有功负荷;  $a_i$  为与频率的  $i$  次方成正比的负荷在  $P_{DN}$  中所占的份额,  $i=0, 1, 2, 3$ 。

在仿真中, 与频率无关的负荷采用恒阻抗模型; 与频率的  $i$  次方成正比的负荷均采用鼠笼式感应电动机模型, 通过其转矩反馈接口和控制箱中的自定义函数即可模拟与频率的 1 次、2 次和 3 次方成正比的负荷。根据典型工业负荷构成, 取  $a_0 = 0.1$ ,  $a_1 = 0.55$ ,  $a_3 = 0.35$ , 负荷分为可切负荷和不可切负荷 2 类, 各占 60% 和 40%, 所切每轮负荷的组成和整个系统的负荷组成相同<sup>[8]</sup>。

在对传统方案的仿真中, 设置基本轮 5 轮, 备用轮 3 轮, 其启动频率、级差和各轮切负荷量按常用方案整定: 启动频率 49.0 Hz, 级差 0.3 Hz, 50% 的可切负荷均分给每个基本轮, 另外 10% 均分给 3 个备用轮<sup>[5]</sup>。

在新方案的仿真中, 设置粗调轮 5 轮, 细调轮 3 轮, 粗调轮和细调轮的切除容量分别和上述方案中的基本轮和备用轮一致, 这样, 对比试验将建立在一致性的基础上。细调轮启动频率  $f_1 = 49.2$  Hz, 频率 PID 闭环控制的各参数取值如下:  $K_P = 0.5$ ,  $K_I = 0.5$ ,  $K_D = 2$ ,  $K = 6$ ;  $F_f = 1.8$  Hz/s,  $F_{rl} = -1$  Hz/s,  $F_{rs} = -0.15$  Hz/s。限于篇幅, 下文只给

出功率缺额很大和较小 2 种典型情况下现有方案和新方案的仿真对比。

#### 4.1 算例 1: 功率缺额很大

在图 2 中,自备发电机 G 的原动机采用水轮机模型,  $t=1$  s 时开关 1 断开,该小区和系统解列,解列前该小区总有功负荷为 4.83 MW,其中从系统 S 吸收有功 2.66 MW,功率缺额占解列前整个系统功率的 55%。新方案和现有方案的全过程控制效果如图 3 所示。

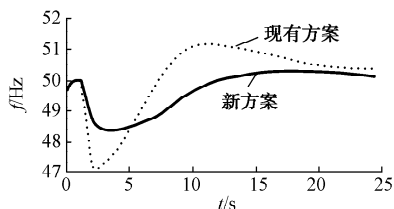


图 3 功率缺额很大时的频率控制曲线  
Fig. 3 Control curves of frequency when active power shortage is large

由图 3 的对比可知,在系统出现巨大功率缺额时,按现有的 UFLS 方案,频率降到很低的水平,甚至降到 47 Hz 以下。另一方面,现有方案普遍存在过切,频率超调到 51 Hz 以上,这是系统运行所不允许的。而在频率 PID 闭环控制方案下,系统的有功缺额在事故出现初期通过切紧急启动轮得到有效抑制;频率上升阶段的跟踪控制使得频率超调得到有效控制;频率上升曲线平滑,使得系统备用容量得到充分释放。

#### 4.2 算例 2: 功率缺额较小

图 2 中,自备发电机 G 的原动机采用汽轮机模型,  $t=3$  s 时开关 1 断开,该小区和系统解列,解列前该小区总有功负荷为 3.2 MW,其中从系统 S 吸收有功 0.67 MW,功率缺额占解列前整个系统功率的 21%。新方案和现有方案控制的仿真结果对比如图 4 所示。

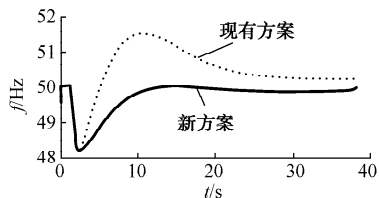


图 4 功率缺额较小时的频率控制曲线  
Fig. 4 Control curves of frequency when active power shortage is small

由图 4 的频率曲线可知,由于现有方案不考虑频率变化率,一律切基本轮,这就使得在频率缺额不大时造成过切,频率超调,同时,频率的上升阶段过于陡峭,不利于备用容量的释放。频率 PID 闭环控

制方案根据  $d\Delta f/dt$  的大小进行相应的切粗调轮和切细调轮动作,避免了过切,也优化了频率恢复曲线。

通过改变系统、发电机、负荷的结构参数和运行参数,进行了 500 多例的仿真。结果表明,不论是在频率下降阶段还是在上升阶段,在频率的恢复速度、超调抑制、最低频率控制等多项指标上,PID 闭环控制均优于传统方案。

## 5 结语

通过分析独立电力系统出现有功缺额事故的发生过程,指出,对于独立电力系统,如果采用现有的 UFLS 方案,不论是修正参数还是整定方案,都很难从根本上提高对扰动抑制的能力。

为此,考虑利用相关开关量的信息迅速启动 UFLS 装置,根据实际测量的功率缺额切除相应负荷,有效避免了出现大功率缺额情况下频率的严重下降。同时引入新的负荷整合方式和频率控制策略,运用 PID 闭环控制取代了现有方案,通过跟踪频率变化、频率变化的时间累积,以及对频率变化率进行相应的控制,从根本上改善了 UFLS 方案的控制效果。仿真分析表明,新方案的频率恢复特性明显优于现有方案。

## 参考文献

- [1] DELFINO B, MASSUCCO S, MORINI A, et al. Implementation and comparison of different under frequency load shedding schemes// Proceedings of IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference; Vol 1, Jul 15-19, 2001, Vancouver, Canada. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 307-312.
- [2] 王建,李兴源,邱晓燕. 含有分布式发电装置的电力系统研究综述. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 90-97.  
WANG Jian, LI Xingyuan, QIU Xiaoyan. Analysis of the power system with distributed generation. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 90-97.
- [3] 时伯年,黄志刚,韩英铎. 并联电容投切对孤立电力系统低频减载设计的影响. 电力系统自动化, 2002, 26(17): 41-44.  
SHI Bonian, HUANG Zhigang, HAN Yinduo. Effect of shunt capacitor switching on UFLS design for isolated system. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(17): 41-44.
- [4] 秦明亮,杨秀朝. 减少低频减载过切的措施研究. 电网技术, 2002, 26(3): 83-86.  
QIN Mingliang, YANG Xiuchao. Measures to reduce over-shedding caused by underfrequency load shedding project. Power System Technology, 2002, 26(3): 83-86.
- [5] 徐泰山,李碧君,鲍颜红,等. 考虑暂态安全性的低频低压减载量的全局优化. 电力系统自动化, 2003, 27(22): 12-15.  
XU Taishan, LI Bijun, BAO Yanhong, et al. Optimal parameter setting of under-frequency and under-voltage load shedding for transient security. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 12-15.

- [6] 熊小伏,周永忠,周家启. 计及负荷特性的低频减载方案的研究. 中国电机工程学报, 2005, 25(19): 49-51.  
XIONG Xiaofu, ZHOU Yongzhong, ZHOU Jiaqi. Study of underfrequency load shedding scheme based on load frequency characteristics. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 49-51.
- [7] 李秀卿,蔡泽祥. 电力系统低频减载控制优化算法. 电力系统自动化, 1998, 22(10): 23-25.  
LI Xiuqing, CAI Zexiang. Load shedding optimizing algorithm for underfrequency of power system. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(10): 23-25.
- [8] 李鸿斌. 低频减载装置的应用与完善. 湖南电力, 2001, 21(17):

25-27.

LI Hongbin. The application and improvement of UFLS equipment. Hunan Electric Power, 2001, 21(17): 25-27.

---

邹 晴(1983—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护与控制. E-mail: zq1943@163.com

林湘宁(1970—),男,教授,研究方向为电力系统继电保护与控制。

翁汉琨(1980—),女,博士研究生,研究方向为电力系统继电保护与控制。

## Close-loop Control Based Under-frequency Load Shedding Strategy Suitable for Isolated Power System

ZOU Qing, LIN Xiangning, WENG Hanli

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** A power system frequency control strategy based on the proportional-integral-derivative (PID) control method is designed. By detecting the variation of the circuit breaker status in an isolated power system, serious faults such as a generator outage and disconnection from the main grid can be identified, then the emergency pick-up step of the under-frequency load shedding (UFLS) device can be immediately started according to the capacity of the removed power, so the abrupt drop of frequency will be restrained. In the subsequent regulating process, the concept of PID closed-loop control strategy is proposed to trace and control the frequency change. Furthermore, the concept of the rough and fine-adjusting step is proposed to cope with the different phases of the frequency variation. The effectiveness of the control strategy proposed has been verified by EMTDC simulations. In addition, the PID frequency control algorithm can be extended to UFLS device of conventional power systems.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50407010).

**Key words:** UFLS; emergent pick-up step; rough-adjusting step; fine-adjusting step; PID closed-loop control