

汽轮发电机组 OPC 控制策略的分析及优化

廖 堃, 封 颖, 李兴源, 徐 娇

(1. 成都电业局, 四川 成都 610021; 2. 四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要:现代化大型机组采用数字电液控制 (DEH), 普遍具有电超速保护控制系统 (OPC), 其中一个很重要的方面是防止汽轮机超速。但如果 OPC 的控制策略不当, 不仅起不到应有的超速保护作用, 而且造成汽门频繁启闭, 产生“乒乓”现象。通过对 OPC 振荡机理的分析, 发现在电网侧发生扰动时, OPC 的控制参数不合理及与其他保护措施不配合是引起系统振荡的根本原因。对 OPC 的动作时限及阀门开度提出相应的修改, 针对 2006 年 7 月 7 日贵阳南部电网事故, 根据实际系统, 用 NETOMAC 程序建立了原动机、调速器和汽轮发电机超速保护的详细模型, 根据理论分析的结果提出了 3 种 OPC 的动作方案并仿真证明了分析结果的正确性。最后提出相应的改进建议。

关键词:超速保护 (OPC); 动作时限; 阀门开度; 调速器; 频率稳定

Abstract: Modern large-scale unit adopts digital electro-hydraulic (DEH) control which generally has overspeed protection control (OPC), and one of its main functions is to prevent steam turbine overspeeding. But if the control strategy of OPC is not appropriate, it will not only fail to execute the overspeed protection, but also cause the valves to open and close frequently, resulting in "ping-pong" phenomenon. Through the analysis of OPC oscillation mechanism, the basic reason which causes system oscillation is the unreasonable control parameters of OPC which is incoordinated with other protective measures. Some modifications are proposed for OPC action time limit and valve opening. For the accident on 7th July, 2006 in Guiyang Southern Grid, the detailed overspeed protection models of prime mover, speed governing device and turbo-generator are established by using NETOMAC based on the real network data, the testing data of the field measurements, and the supplement data of classic values. According to the theoretical analysis of the results, three kinds of OPC action schemes are put forward and the simulation proves the correctness of the theoretical analysis. At last, the suggestions for improvement are presented.

Key words: overspeed protection control (OPC); action time limit; valve opening; speed governing system; frequency stability

中图分类号: TK323 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2010)02-0001-06

0 引言

超速保护器 (overspeed protection controller OPC) 是数字式电气液压 (digital electric hydraulic DEH) 调节系统的重要组成部分。保证热动系统 (汽轮机及调速系统) 处于安全稳定的运行状态是机组超速保护的目标。当 OPC 的转速是额定转速的 103% 时, 通过快速关闭调节汽阀可实现对机组的超速保护^[1]。在单一故障模式下, 通常根据 OPC 所在电网的情况灵活整定 OPC 的动作特性^[2], 但 OPC 控制策略的正确性需要在实际电网事故中进行校验^[3]。发电机组并网运行时, 如果 OPC 控制策略选择不当, 不仅无法实现超速保护, 而且会使汽门频繁

开关, 产生“乒乓”现象, 给机组轴系和热力系统造成频繁冲击, 严重影响机组安全, 甚至可能使电网大规模地甩负荷, 发生频率振荡或频率失稳事故, 最终造成整个电网崩溃。

OPC 动作后恢复带负荷的时间较长, 也是造成电厂汽轮机快速解列及电网不稳定的较大因素之一。因此, 缩短 OPC 动作时间、快速开启汽轮机调门、接带负荷成为处理该类事件的要点。同时 OPC 动作延时点与退出点对抑制振荡、迅速恢复功率、防止事故扩大与正确保护汽轮机有重要意义。因此需要对 OPC 的特性及设置进行深入研究。事故现象还表明单纯依靠某一种频率控制手段往往不能将频率稳定。即便是在多种频率控制手段配合下, 也可能出现配合不当恶化频率稳定问题。

迟缓率对汽轮机运行是十分不利的, 因为迟缓率

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2008BAA13B01); 国家自然科学基金基金项目 (50877050)

越大,说明从汽轮机转速变化到调节汽门动作的时间间隔越大,造成汽轮机不能及时适应外界负荷变动的不良现象^[4]。特别是机组甩负荷时,迟缓率造成的调节汽门关闭滞后,将使转速升高过多,从而引起危急保安器动作。而速度变动率越大,动态超速也越大。迟缓率与速度变动率的共同影响,就在较大范围内破坏了功率与转速的单值对应关系。那么在 OPC 的动作时限中就应该考虑迟缓率与速度变动率的影响。

文献 [5] 针对云南电网火电机组频率异常情况下的运行要求,制定了第三级控制措施,即机网协调配合;并网闭锁 OPC,机组解列后开放 OPC 功能。文献 [6] 针对昆明发电厂“2·24”事故的发生,提出了 6 条建议,其中包括 OPC 动作值的整定、动作时限的确定以及控制逻辑的优化。文献 [7] 论述国内外几种典型机组实现数字电液控制 OPC 的基本原理及其技术特色。文献 [8] 和文献 [9] 提出在转速回路增加功率不平衡的补偿,可使 OPC 不仅具备汽门快关的功能,且在不同负荷下对甩负荷工况的适应性良好。文献 [10] 提出了发电机高频切机与汽轮机 OPC 协调配合的保护方案,给出了防止地区及大型送端电网解列后高频运行的 3 层次安全稳定控制措施。

从 OPC 动作的基本逻辑及其动作延时点、退出点出发,分析了 OPC 引起系统振荡的原因并修改 OPC 的动作特性,得到动作时限及阀门开度的表达式。以 2005 年南方电网的实测数据为基础,根据 2006 年 7 月 7 日贵阳南部电网事故,运用 NETOMAC 建立原动机、调速器和 OPC 的模型,对提出的 3 种修改方案进行仿真,论证了理论分析的合理性,并提出了相应的改进建议。

1 OPC 振荡机理分析

1.1 OPC 模型

DEH 的保护系统 OPC 功能设定为转速达到 $103\% n_0$ 时快关中压调节汽阀;在 $103\% n_0 < n < 110\% n_0$ 时,超速控制系统通过 OPC 电磁阀快关高、中压调节汽阀,实现对机组的超速保护。

OPC 的基本动作描述如下。

通过逻辑电路控制调速和 OPC 动作的选择,即当指令条件不满足,OPC 不动作时控制通路保持调速器调节,由调速器的调频环节进行跟踪调节;当指

令条件达到,屏蔽调速器,控制通路转到 OPC 逻辑,完全由 OPC 进行控制阀门。OPC 的动作逻辑简单类似于一个由转速整定的二值电平控制模型,即转速升至 $3\ 090\text{ r/min}$ 由执行机构动作,汽门全关;转速降至 $3\ 000\text{ r/min}$ 由执行机构动作,阀门全开。

OPC 的简单动作特性如图 1 所示。可知 OPC 实现的是典型的开环控制快关快开规律。

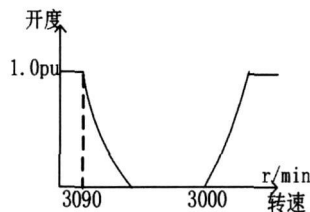


图 1 OPC 简单动作特性图

1.2 OPC 振荡机理分析

OPC 的动作特性说明:高频 51.5 Hz (对应机组转速为 $3\ 090\text{ r/min}$) 产生后,汽轮机阀门全由 OPC 控制。如果发电机组不切机,根据 OPC 的动作特性,此时情况类似于汽轮机的快关控制。如图 2 所示,表明了频率在 OPC 作用下的变化过程。机组转速达到 $3\ 090\text{ r/min}$ 时经 $t_0 \sim t_1$ 时间,调节阀全关,原动机的出力骤减至零,机组的过剩能量被 OPC 迅速减小,而不至于使机组处于危险的境地。

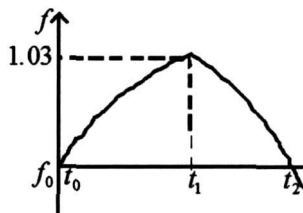


图 2 OPC 动作下的频率动态

设机组稳态出力 P_g , 负荷 P_{load} , $P_g = P_{load}$ 。在 t 时刻,负荷突减 ΔP_{load} , 机组功率过剩,若一调频调减出力不足,一次调频最大减少出力 $\Delta P_r < \Delta P_{load}$, 此时机组实发功率为 $P_{g1} = P_g - \Delta P_r$, 剩余负荷为 $P_{load1} = P_{load} - \Delta P_{load}$, $t \sim t_1$ 时间内机组过剩功率为

$$\Delta P_{o1} = P_{g1} - P_{load1} = \Delta P_{load} - \Delta P_r \quad (1)$$

机组以过剩功率加速,OPC 动作后,机组实发功率为 $P_{g2} = 0$, 剩余负荷为 $P_{load2} = P_{load1} = P_{load} - \Delta P_{load}$, $t_1 \sim t_2$ 时间内机组过剩功率为

$$\Delta P_{o2} = P_{g2} - P_{load2} = -(P_{load} - \Delta P_{load}) \quad (2)$$

因此,机组以过剩功率 $-\Delta P_{o2}$ 为阻尼进行减速。同时,一次调频的动态调节不再起作用,OPC 信号全占阀门控制。当转速降至 $3\ 000\text{ r/min}$ 时,OPC 全开

阀门, 机组实发功率为 $\Delta P_{g3} = P_{g1} = P_g - \Delta P_r$, 剩余负荷为 $P_{load3} = P_{load2} = P_{load} - \Delta P_{load}$, $t \sim t$ 时间内系统过剩功率为

$$\Delta P_{o3} = P_{g3} - P_{load3} = \Delta P_{load} - \Delta P_r \quad (3)$$

忽略机组其他阻尼的情况下, 由转子运动方程(标么值表示)

$$J \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \quad (4)$$

对转子进行积分计算可得

$$t = \int_{\omega_j}^{\omega} \frac{J}{P_m - P_e} d\omega \quad (5)$$

$P_m - P_e$ 即为机组过剩功率。分别将式(1)、(2)、(3)代入式(5), 可得第一次加速时间为

$$t_1 = \int_{1.0}^{1.03} \frac{J}{\Delta P_{load} - \Delta P_r} d\omega \quad (6)$$

第二次“加速”(实际是减速)时间为

$$t_2 - t_1 = \int_{1.03}^{1.0} \frac{J}{-(P_{load} - \Delta P_{load})} d\omega \quad (7)$$

线性化处理可以认为

$$\begin{aligned} & (\Delta P_{load} - \Delta P_r)(t_1 + t_2 - t_1) \\ & = (P_{load} - \Delta P_{load})(t_2 - t_1) \end{aligned} \quad (8)$$

计算得到

$$t_2 = (P_{load} - \Delta P_r)(t_2 - t_1) / (\Delta P_{load} - \Delta P_r) \quad (9)$$

由此可以计算得到 t_2 时刻对应的频率为

$$f_{low} = \omega_{low} = 1.0 - [(P_{load} - \Delta P_{load})t_2 - (P_{load} - \Delta P_r)t_1] / J \quad (10)$$

当机组为实际特定汽轮机组时, J 是已知的, 在 OPC 按照在 3090 r/min 全关, 3000 r/min 全开阀门整定时, 通过式(10)即可计算得到汽轮机频率振荡的最低值。该值如果过低, 将引起低频减载装置启动, 以促使机组频率加速回升, 如果电网其他机组调频不力, 频率将会更快地升至高频, 机组再次在 OPC 控制下振荡, 如此恶性循环, 造成严重事故。

1.3 OPC 动作特性的修改

根据 OPC 的实际动作特性, 如果在系统频率上升阶段和下降阶段分别采用不同的控制策略, 可避免汽门的频繁启闭和“乒乓”现象。OPC 动作后, 强占机组控制权, 但最终转速稳定控制仍由调速系统完成。

OPC 动作后阀门关闭及开启的多少与振荡现象也有密切关系。从文献[15]中描述的汽轮机调节系统模型来看修改阀门的开度值可以从 OPC 本身的控

制策略改进, 也可以在 OPC 实施简单快关快开控制策略的同时, 对高压调节门和中压调节门实施不同的控制方法, 调整其开度。

对不同机组, OPC 的复位时间有所不同。应该根据系统和机组情况, 确定恰当的 OPC 的复位时间。否则, 由于实际转速与给定转速之差引起二次转速飞升, 其危害甚至超过一次转速飞升。

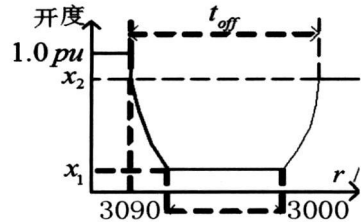


图 3 修改后的 OPC 动作特性图

如图 1 所示 OPC 的动作是一个数字控制器, 其动作逻辑是可以修改和整定的, 如图 3 修改后的 OPC 动作特性中可以人为调整的参数有: ①上升阶段和下降阶段采取的控制策略; ②汽门最小开度 x_1 ; ③汽门最终开度 x_2 ; ④汽门关闭时间 t_{off} 。

1.3.1 OPC 动作时限的确定

如果暂不考虑发电机组、一次调频、负荷等因素产生的功率调节效应, 在 OPC 动作时系统过剩功率以 ΔP , 则若 $\Delta P_{off} \leq \Delta P$, OPC 不足以抑制过剩功率, 即频率超升; 若 $\Delta P_{off} > \Delta P$, OPC 可以抑制过剩功率, 频率会下降至正常之下。根据各台机组调速系统的速度变动率、迟缓率确定 OPC 的动作时限。

$$\begin{aligned} \Delta P_{off} &= (1 - x_1) \frac{t_{ff} + t_{to}}{2} + k(1 - x_2) \\ &\geq \Delta P = \Delta P_{load} - \frac{\epsilon}{\delta} P_H \end{aligned}$$

ϵ 为迟缓率, δ 为转速不等率。k 为阀门度与有功出力的折算系数。

为简便起见, 首先固定汽门的最小开度为 0, 最终开度为 1, 可得到

$$\Delta P_{off} = 1.0 \times \frac{t_{ff} + t_{to}}{2} \geq \Delta P = \Delta P_{load} - \frac{\epsilon}{\delta} P_H$$

通常 OPC 的延时动作时间 t_1 及开启时间 t_2 都已在频率上升和下降阶段的控制策略中给定, 则 $t_{ff} = t_1 + t_2 + t_{to}$ 。

$$\begin{aligned} \Delta P_{off} &= 1.0 \times \frac{t_1 + t_2 + t_{to} + t_{to}}{2} \\ &\geq \Delta P = \Delta P_{load} - \frac{\epsilon}{\delta} P_H \end{aligned}$$

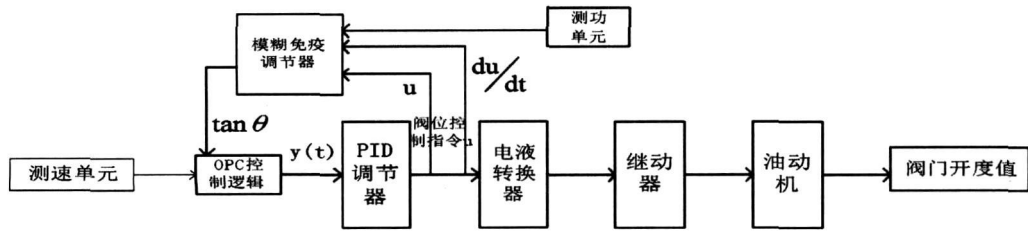


图 4 OPC 的控制流程

可解出

$$t_{no} \geq \frac{2(\Delta P_{load} - \frac{\epsilon}{\delta} P_H) - t_b - t_i}{2}$$

有关文献表明, OPC 动作维持时间过长和过短都不合适, 要求不小于油动机的关闭时间。一般要求复位时间在 $(1 \pm 0.5) s$ 即可^[12]。

1.3.2 输出调节门开度基准

在本设计的 OPC 对阀门的控制中, 同时计及转速变化和功率变化的影响, 从而形成一个闭环控制。从 OPC 的动作特性可以看出, 在频率上升和下降阶段的曲线中, 在每个频率点附近线性化, 在数学表达式上可以线性化认为是爬坡函数, 那么在爬坡函数中将频率的变化作为其自变量, 函数的斜率利用模糊免疫控制算法^[13 14 15]加入功率变化的因素。PID 控制参数能灵活地加以整定, 对频率偏差信号进行适应性的调节、校正。利用 DEH 的转速闭环控制功能^[16], 采用 PID 调节器, 既可克服中间再热蒸汽的容积效应引起的影响, 又有利于保证必要的静特性。

免疫反馈原理得出的反馈控制规律为

$$u(k) = K(1 - \eta f(u(k), \Delta u(k))) \epsilon(k) = k_{pi} \epsilon(k)$$

式中, $k_{pi} = K(1 - \eta f(u(k), \Delta u(k)))$; $K = k_i$; K

为控制反应速度; $\eta = \frac{k_d}{k_i}$, η 为控制稳定效果; $f(\square)$ 为一选定的非线性函数, 利用模糊控制器可逼近非线性函数 $f(\square)$ 。采用上述模糊免疫控制原理对爬坡函数中的斜率进行调节, 使其具有自适应的功能。

令 $\epsilon(k) = \Delta P$, 采用模糊免疫 PID 控制中的比例增益控制, 避免由积分及微分环节对输入信号引入的相位偏差。斜率 $\tan \theta$ 定义为

$$K_{in} = K(1 - \eta f(u(k), \Delta u(k)))$$

其中, $K = 20$ 为固定比例系数; η 为控制稳定效果调整系数, 这里设置为 1; $f(u(k), \Delta u(k))$ 为一非线性函数, 采用 4 条模糊控制规则逼近。

(1) If $U(k)$ is P and $\Delta U(k)$ is P then $f(\square)$ is

N;

(2) If $U(k)$ is P and $\Delta U(k)$ is N then $f(\square)$ is

Z;

(3) If $U(k)$ is N and $\Delta U(k)$ is P then $f(\square)$ is

Z;

(4) If $U(k)$ is N and $\Delta U(k)$ is N then $f(\square)$ is

P。

在各条模糊控制规则中, 采用常用的 $\max - \min$ 推理机对上述规则进行推理, 再采用最大隶属度法设计系统的解模糊器。得到确定的输出量 $f(\square)$, 代入前式即可求出斜率值。

输出的函数值 $y(t)$ 作为转速 PID 的输入, PID 控制器计算出油动机的行程, 经过电液转换器转换, 控制汽门开度发生改变, 使汽轮机实际转速逐渐与给定值相等, 消除转速偏差, 达到控制机组频率的目的。根据功频调速器模型^[17]可得 OPC 的控制流程, 如图 4 所示。

2 仿真结果及分析

利用 2006 年 7 月 7 日贵阳南部电网故障及发生的 OPC 的动作过程, 用 NETOMAC 程序建立原动机、调速器和 OPC 的详细模型。

根据文献 [18]、[19] 对故障的描述, 清镇电厂 7 号机组 OPC 动作特性不恰当是引起系统持续振荡的直接原因。因此修改清镇电厂 7、8 号机组 OPC 的控制策略, 并根据 1.3 节对 OPC 特性作出的修改, 设置 OPC 动作特性的方案如下。

方案 1 (见图 5): 修改清镇电厂 7 号机组和 8 号机组 OPC 动作特性。当机组转速为 3090 r/min 时, 延时 3 s 后 OPC 控制阀门全部关闭; 当机组转速为 3000 r/min 时, 不延时 OPC 控制阀门全部打开。并按照式 (12) 修改 OPC 动作时限。

方案 2 (见图 6): 将 OPC 回路与伺服执行机构相

结合可实现复杂的快关控制规律,可克服简单快关控制存在的适应性差造成的过制动或制动不足的缺陷,而且增加后摆阻尼。采用与方案 1 相同的 OPC 控制策略,对中压调节门采用开关控制的同时,对高压门采用线性最优控制以增加快关后转子后摆的阻尼^[20],使振荡尽快衰减。

方案 3(见图 7):采用与方案 1 相同的 OPC 控制策略,并在调节系统回路上加入 1.3.2 节分析的阀门控制逻辑。

采用方案 1 所得到的仿真结果可知,OPC 的上升阶段和下降阶段所采用的控制策略与 OPC 的动作时限相结合可以缩短系统的振荡时间。

采用方案 2 所得到的仿真结果可知,得到的系统最低频率高于方案 1 得到的最低频率,因此不会出现过多系统切负荷的情况。系统振荡次数减少。

采用方案 3 所得到的仿真结果可知,得到的系统最低频率高于方案 2 和方案 1 得到的系统最低频率,不会出现系统切机、切负荷等情况,可以迅速稳定系统频率,较好地抑制系统振荡。

方案 2 与方案 3 中,OPC 的动作次数明显低于方案 1。

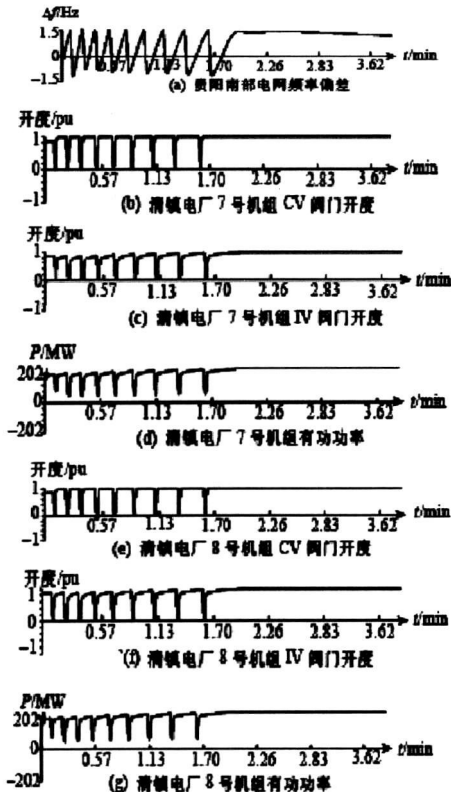


图 5 方案 1 动作特性仿真图

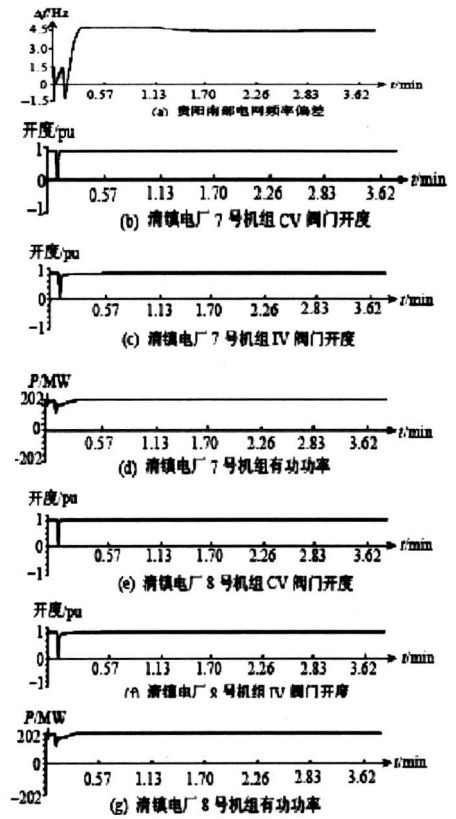


图 6 方案 2 动作特性仿真图

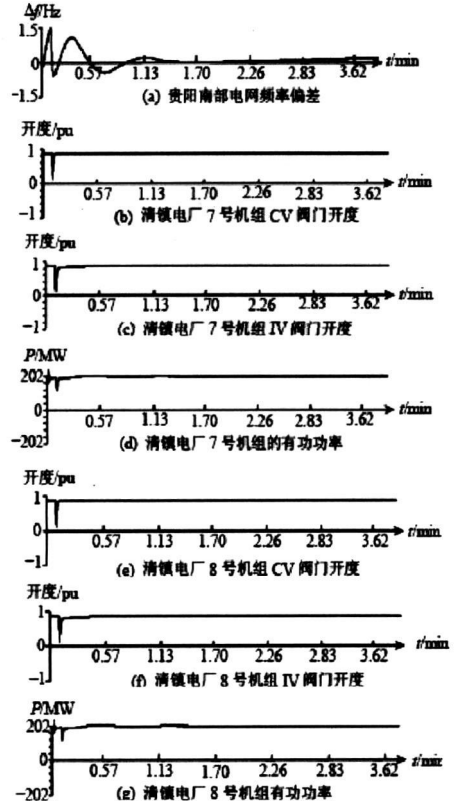


图 7 方案 3 动作特性仿真图

3 改进建议

(1) 将 OPC 与其他频率稳定措施配合, 如一次调频、高频切机、低周减载、DEH 的自动调频功能。防止 OPC 动作引起的频率最低值达到低周减载的动作值, 引起低周减载动作, 从而使频率上升更快, 再次引起 OPC 的动作。可以适当增大一次调频的死区和一次调频限制幅度, 从而减少 OPC 的动作次数。高频切机的动作值与 OPC 相互配合, 可以减少系统的振荡次数。将 OPC 的动作特性与 DEH 的自动调频功能相结合考虑, 就可以重新整定 OPC 的动作值。

(2) 智能电网的一个重要特征就是其自愈功能。OPC 动作一个重要的因素就是系统与电网解列之后形成孤网引起的, 因此减少 OPC 动作次数一个有效的方法就是在系统解列之后尽可能快地重新并网运行, 从而将 OPC 闭锁, 减少系统振荡次数。

(3) 在实际系统中, 速度变动率和迟缓率的大小与系统运行条件和测量手段有关。因此在做甩负荷实验时, 可解除 103% 动作回路, 保持油开关跳闸 OPC 动作回路, 就可以完整获取调节系统的速度变动率^[21]。迟缓率的大小, 与机组传动机构及配汽机构的磨损以及调节部件的卡涩有关。应注意对这些部件的维修与调节。在确定 OPC 动作时限的同时, 也应考虑与机组的运行方式协调。

(4) 根据仿真结果, OPC 采取简单快关快开控制策略时, 对高压调节门和中压调节门采取不同的控制方法, 同样可以减少 OPC 的振荡次数。

4 结论

火电机组的 OPC 保护功能不能只考虑保机组设备安全, 同时还要考虑电网安全, 应将两者结合统一考虑。通过对 OPC 引起振荡的机理分析, 动作特性的修改以及设置的方案仿真分析, 得到如下结论。

(1) OPC 振荡的原因在于其控制参数的不合理, 并且与一次调频、高频切机、低周减载等保护措施的配合有密切关系。

(2) 针对 OPC 振荡机理的分析, 得出动作时间的数学表达式; 通过 OPC 的动作特性图分析得到阀门开度的表达式及其动作流程。

(3) 根据对 OPC 动作特性的修改提出了 3 种修

改方案, 仿真结果发现这 3 种方案均可以稳定系统频率, 较好地抑制系统振荡, 验证了理论分析的正确性。提出了 OPC 控制参数与其他频率稳定措施动作值相配合, 智能电网与机组协调, 增加功率控制信号等 5 个改进措施。

参考文献

- [1] 肖增弘, 徐丰. 汽轮机数字式电液调节系统 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [2] 宋铭. 纳雍发电总厂 4 号 300 MW 机组 OPC 功能改造 [J]. 贵州电力技术, 2005, (11): 1-3.
- [3] 蔡运清, 汪磊, KipMorison 等. 广域保护 (稳控) 技术的现状及展望 [J]. 电网技术, 2004, 28(8): 20-25.
- [4] 刘全社. 汽轮机调速系统速度变动率和迟缓率的探讨 [J]. 汽轮机技术, 2001, 43(4): 244-245.
- [5] 吴琛, 李文云, 杨强, 等. 云南电网高频率问题与火电机组 OPC 功能协调配合研究 [J]. 云南电力技术, 2005, 12(33): 1-3.
- [6] 李飏. 火电机组 OPC 超速保护动作特性分析 [J]. 电力安全技术, 2005, 12(7): 21-22.
- [7] 田丰, 张俊杰. 大型机组电超速保护装置综述 [J]. 国际电力, 2001, (4): 13-18.
- [8] 梁京英. 珠海电厂 700MW 机组 OPC 系统特性分析 [J]. 电力系统装备, 2003, (11): 83-84.
- [9] 田丰, 余天龙, 欧坚, 等. 珠海电厂 700 MW 机组超速限制系统特性分析 [J]. 热力发电, 2001(3): 46-48.
- [10] 孙华东, 王雪东, 马世英, 等. 贵州主网及其地区电网孤网运行的安全稳定控制 [J]. 电网技术, 2008, 32(17): 35-39.
- [11] 张利平. 汽轮机调节系统工作不稳定原因分析 [J]. 内蒙古科技与经济, 2006(11): 54.
- [12] 张镇一, 朱程滨. 电超速保护装置的分析与评价 [J]. 汽轮机技术, 1995, 37(6): 321-326.
- [13] 江中央, 蔡自兴, 龚涛. 一种改进的模糊免疫反馈 PID 控制器 [J]. 控制工程, 2008, 15(5): 485-488.
- [14] 吕岗. 免疫算法及其应用研究 [D]. 中国矿业大学.
- [15] 郑恩让, 回立川. 免疫优化模糊控制及其应用 [J]. 控制工程, 2006, 13(5): 460-462.
- [16] 史建良, 王新宇, 李国宝, 等. 国产 200 MW 机组甩负荷试验与分析 [J]. 中国电力, 2003, 36(11): 53-56.
- [17] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [18] 黄宗君, 李兴源, 晁剑, 等. 贵阳南部电网 7-7 事故的仿真反演和分析 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(9):

(下转第 69 页)

表 5 H 级 NOMEX 纸绝缘浸漆式干式变压器主要耗材用量及成本

容量	铁心硅钢片重量 /kg	高低绕组铜线重量 /kg	NOMEX 纸占铜线重量 /%	NOMEX 纸占铜线重量 /kg	NOMEX 纸总成本 /元 (按 450 元 /kg 计算)
1 000	1 727	高压 340	1.26	4.3	1 935
		低压 320	1.22	3.9	1 755
1 250	1 894.4	高压 410	1.35	5.5	2 475
		低压 430	1.02	4.4	1 980

树脂浇注式干式变压器生产设备不同的是有真空压力浸漆设备,没有环氧树脂真空浇注设备。由于环氧树脂真空浇注设备的价格比真空压力浸漆设备价格要高出 2 倍多,且线圈绕组在用环氧树脂浇注时必须使用不锈钢浇注模具,每套模具价格约在 2~3 万元,批量系列生产需用几十套不锈钢模具,总价格近百万元。而真空压力浸漆需用的工装既简单又通用,一套工装设备就能满足不同容量级纸绝缘浸漆式干式变压器的批量生产需要,所以在一般情况下,H 级 NOMEX 纸绝缘浸漆式干式变压器的生产成本要比环氧树脂浇注式干式变压器的生产成本低大约 5% 左右。

4 结 论

2009 年国网公司提出建设统一坚强智能电网,智能电网的目标是实现电网运行的可靠、安全、经济、高效、环境友好和使用安全。开关和变压器是数量最多、应用面最广的重要电力设备,在实现灵活可控的同时,智能电网对设备安全、经济会有更高的要求^[12]。

以上介绍了 3 种新型绝缘材料:硅油、高燃点 β 油、NOMEX 绝缘纸。硅油变压器多用于易燃、易爆及对安全要求高的场所,硅油变压器中的硅油价格比变压器油贵,但是其综合技术性能在变压器市场有其特有的优势。 β 油可完全生物降解,无毒性,对人体和环境无危害,可循环利用,而且与变压器中其它材料具有相容性,与常规油可以混合使用。 β 油变压器材料成本高出普通油变压器 25% 左右,而比浇注干式变压器材料成本低 40% 左右,经济效益很明显。

NOMEX 绝缘纸耐热特性明显优于环氧树脂绝缘材料,若将其应用于变压器中,一般情况下,变压器的生产成本要比环氧树脂浇注式干式变压器的生产成本低大约 5% 左右。

参考文献

- [1] 侯盈, 马郁聪, 鱼震民. 浅谈国内干式变压器的几个问题 [J]. 变压器, 2005, 42(12): 15-18.
- [2] 侯盈, 鱼震民. 对降低高燃点油变压器成本及其功能延伸的几点思路 [J]. 变压器, 2007, 44(7): 5-6.
- [3] 韩进贤, 孙攀. 硅油与矿物油用作变压器油的性能比较 [J]. 有机硅材料, 2000, 14(5): 18-19.
- [4] 邹武. 环保变压器油——硅油 [J]. 电气制造, 2008(12): 64-65.
- [5] 侯盈, 鱼振民, 彭国平. 浅谈 Beta Fluid 高燃点油浸变压器 [J]. 变压器, 2003, 40(8): 16-19.
- [6] 衣家文. 高燃点变压器油 [J]. 变压器, 2005, 42(11): 13-15.
- [7] 郭宏山, 周晓凡. 高燃点绝缘油变压器的应用 [J]. 变压器, 2005, 42(11): 10-12.
- [8] 柳泽荣, 丁在兴, 翟岩, 等. 油色谱分析在变压器故障诊断中的应用 [J]. 变压器, 2005, 42(9): 43-46.
- [9] 桑会凯. H 级 NOMEX 纸绝缘干式变压器 [J]. 变压器, 2003, 40(8): 13-16.
- [10] 龚家珑. 环氧树脂浇注式和 NOMEX 纸绝缘浸漆式干式变压器技术 [J]. 华中电力, 2003(6): 54-56.
- [11] Sundovist K. 变压器中气体的产生 [J]. 环烷, 2002(1): 10-11.
- [12] 谢开, 刘永奇, 朱治中, 等. 面向未来的智能电网 [J]. 中国电力, 2008, 41(6): 19-22.

(收稿日期: 2009-12-27)

(上接第 6 页)

95-100.

- [19] 黄宗君, 晁剑, 李兴源, 等. 贵阳南部电网高频问题与超速保护器仿真研究 [J]. 电网技术, 2007, 31(15): 26-32.
- [20] 于达仁, 杨永滨, 毛志伟, 等. 复杂快关控制规律在 DEH 系统中的实现 [J]. 汽轮机技术, 1997, 39(3): 157-160.
- [21] 田丰, 余天龙. 大型机组甩负荷试验若干问题探讨

[J]. 电力建设, 2009(9): 48-51.

作者简介:

- 廖 莹 (1979-), 男, 从事地区电网电力调度工作。
封 颖 (1982-), 女, 从事地区电网电力调度工作。
李兴源 (1945-), 男, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 中国电机工程学会理事, 研究方向为电力系统分析、稳定和控制等。
徐 娇 (1983-), 女, 从事地区电网电力调度工作。

(收稿日期: 2009-10-10)