

DOI: 10.7667/PSPC170072

基于仿人智能控制的火电厂 AVC 系优化研究

苏杰¹, 孙金龙¹, 刘友宽², 刘适¹

(1. 华北电力大学, 河北 保定 071000; 2. 云南电力试验研究院(集团)有限公司, 云南 昆明 650000)

摘要: 目前, 国内部分火电厂存在着母线电压和无功转换偏差大、脉宽调节时间不合理、无功控制和励磁控制相互不协调等问题, 影响到火电厂自动电压控制系统的投运率和合格率。为解决上述问题, 结合云南某火电厂自动电压控制系统的设计特点, 建立了该厂单机自动电压控制系统模型。为了提高动态调节性能指标, 改善控制效果, 提出了仿人智能电压控制器和仿人智能无功控制器相结合的控制策略, 来替代现场采用的电压 PID 控制和机组无功非线性控制。通过仿真验证了该控制策略的优越性, 实现了对火电厂自动电压控制系统的优化研究。

关键词: 自动电压控制系统; 建模; 仿人智能控制; 优化

Research on AVC system optimization of power plant based on human-simulated intelligent control

SU Jie¹, SUN Jinlong¹, LIU Youkuan², LIU Shi¹

(1. North China Electric Power University, Baoding 071000, China;

2. Yunnan Electric Power Research Institute (Group) Co., Ltd., Kunming 650000, China)

Abstract: At present, in some of the domestic thermal power plants, there are some problems such as large deviation between bus voltage and reactive power conversion, unreasonable pulse width adjustment time, reactive power control and excitation control being uncoordinated, etc., affecting the commissioning and qualified rate of thermal power plant automatic voltage control system. In order to solve the above problems, combined with the design features of automatic voltage control system of a thermal power plant in Yunnan province, this paper establishes a stand-alone automatic voltage control system model for the plant. In order to improve the dynamic adjustment performance index and the control effect, a control strategy combining human-simulated intelligent voltage controller and humanoid intelligent reactive power controller is proposed to replace the voltage PID control and unit reactive power nonlinear control on spot. The simulation proves the superiority of the control strategy, realizing the optimization of the automatic voltage control system of the thermal power plant.

Key words: automatic voltage control system; modeling; human-simulated intelligent control; optimization

0 引言

目前, 自动电压控制 (Automatic Voltage Control, AVC) 系统成为调节电网系统无功平衡和维持电压稳定的重要手段。电厂作为重要的无功源, 其 AVC 系统的投运可以充分利用发电机的无功出力, 减少运行费用和额外无功补偿设备投资, 有效降低发电厂运行人员的工作强度, 避免因误操作而引发事故, 降低电能传输中的无功损耗, 提高电网电压的稳定性, 改善电网系统运行的品质^[1-2]。根据云南电网有限责任公司编写的《云南电网 2016 年运行方式》, 截止 2016 年 1 月 30 日, 火电共 9 座, 总装机为 12 400 MW, 占云南总装机容量的 18.82%, 完成 AVC 试验的

有 1 座。

目前, 电厂侧 AVC 系统优化研究方向主要集中在水电厂和保护逻辑方面, 对于火电厂控制方面的优化很少, 并且缺少比较准确的模型检验。为使水电站内网络损耗降低到最小, 文献[3]提出进化规划法对无功的优化分配控制, 文献[4]提出改进遗传算法对无功的优化分配控制。为消除电厂侧 AVC 子站功率耦合所带来的安全隐患, 提高发电机组的安全稳定性, 文献[5]提出了采用远方控制与现地调节相结合的控制方式, 以弥补电厂侧 AVC 子站安全约束控制策略存在的缺陷。针对电厂并网方式变化可能带来电压大幅波动的问题, 文献[6]提出了基于 Boltzmann 公式的自适应变步长电压控制方法, 根据母线电压调节偏差采用快速逼近的方法实现母

线电压跟踪调节功能。

为解决火电厂存在的母线电压调节偏差转换成全厂无功设定值不准确、机组无功控制器发出的脉宽调节时间不适合当前工况、无功控制系统与励磁控制系统之间不协调等问题，弥补参考文献[4-7]没有提供具体数学模型检验的缺点，结合云南某火电厂 AVC 系统的设计特点，建立了该厂单机 AVC 系统模型，并以现场试验数据检验模型的准确性。根据 AVC 系统的特点和实际工况，为改善控制系统的动态调节效果，替代现有的电压 PID 控制器和机组无功非线性控制器，提出了仿人智能电压控制器和仿人智能无功控制器相结合的控制策略，并用已建立的数学模型加以仿真研究。结果表明，该控制策略在提高控制系统动态调节性能方面具有优势。

1 云南某发电厂 AVC 系统试验

云南某火电厂装机容量为 2×300 MW，采用 500 kV 线路出线的方式，其 AVC 系统采用基于 DCS 一体化的设计方法，大大减少了设备投资。该厂机组一直处于单机半负荷的运行状态，只能进行单机电厂闭环和调度闭环 AVC 试验。图 1 为单机 AVC 电厂闭环试验趋势图，对试验数据分析处理后可知，



图 1 单机 AVC 电厂闭环试验趋势图

Fig. 1 Trend of closed-loop test of stand-alone AVC power plant

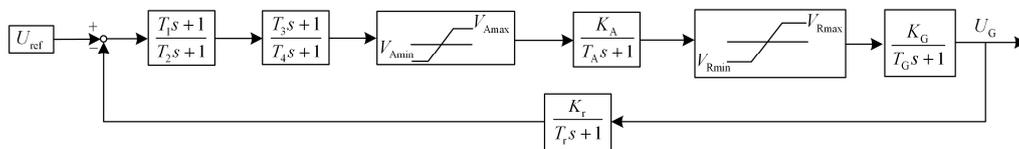


图 3 同步发电机 AVR 模型

Fig. 3 Synchronous generator AVR model

机组无功调节器采用脉宽控制，综合考虑脉宽控制时间和脉宽形成周期的限制，形成 T 秒为一个控制周期，其综合脉宽控制时间如式(2)所示。其中，

响应时间小于 30 s，调节速度大于 1 kV/5 min，动态偏差小于 0.5 kV，静态偏差小于 0.5 kV，AVC 系统达到调度考核的要求。

2 云南某火电厂 AVC 系统模型

2.1 某火电厂 AVC 系统模型

根据云南某火电厂机组的运行现状，建立如图 2 所示的单机 AVC 系统模型，包括三个闭环控制回路^[7-9]。最外层控制回路完成母线电压的控制，采用 PID 调节器实现母线电压调节偏差转换成全厂无功设定值。机组采用串级控制，外回路完成无功闭环调节，调节器采用非线性控制，内回路完成机组 AVR 调节，调节发电机机端电压和无功出力。

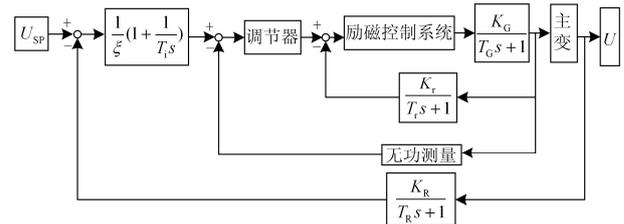


图 2 火电厂 AVC 系统建模框图

Fig. 2 AVC system modeling block diagram of thermal power plant

火电厂同步发电机 AVR 模型如图 3 所示，主要包括测量变送单元、综合放大单元、励磁调节单元、限幅单元和同步发电机组成^[10]。

对于无功测量环节的处理，根据文献[11]，忽略电网和电厂之间的联系电阻和电抗，同时考虑到主变高压侧母线电压受到电网系统的牵制，其变化一般在 1%以内，认为机端电压和机端无功近似呈线性关系，考虑到通过测控装置采集同步发电机机端的无功功率存在误差和延迟，采用如式(1)所示的一阶惯性环节近似代替。

$$G(s) = \frac{K_Q}{T_Q s + 1} \quad (1)$$

式中： K_Q 为放大系数； T_Q 为时间常数。

e 为无功调节偏差，单位为 Mvar； t 为发出控制脉宽时间，单位为 s；正号省略，表示作用增磁通道，负号表示作用减磁通道； t_{min} 为发出的最小脉宽时

间; t_{\max} 为发出的最大脉宽时间; Q_{die} 为无功调节死区; Q_{\min} 为发出脉宽对应的最小无功偏差; Q_{\max} 为发出脉宽对应的最大无功偏差。

$$t = \begin{cases} 0, & |e| \leq Q_{\text{die}} \\ t_{\min}, & Q_{\text{die}} < e \leq Q_{\min} \\ -t_{\min}, & -Q_{\min} \leq e < -Q_{\text{die}} \\ ke, & Q_{\min} < |e| \leq Q_{\max} \\ t_{\max}, & e > Q_{\max} \\ -t_{\max}, & e < -Q_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

实际工程中, 脉宽控制信号通过增减磁通道作用于继电器上, 励磁调节器将继电器的断开和闭合时间转换成机端电压的参考值, 可以将该环节简化为如式(3)所示的积分环节和一阶惯性环节的串联。

$$U_{\text{ref}}(s) = \frac{1}{T_6 s} \cdot \frac{K_5}{1 + T_7 s} \quad (3)$$

式中: K_5 为放大倍数; T_6 为积分时间常数; T_7 为惯性时间常数。

对于主变环节的处理, 根据文献[12-13], 变压器消耗的总无功 ΔQ 可用式(4)表示, 式中 X_T 为等效电抗, G_T 为等值电导, B_T 为等效励磁电纳。忽略发电机机端电压和主变低压侧电压之间的微小压降, 即机端电压 U_G 和低压侧电压 U_1 近似相等。

$$\Delta Q = -B_T U_1^2 + \frac{(P_1 - G_T U_1^2)^2 + (Q_1 + B_T U_1^2)^2}{U_1^2} X_T \quad (4)$$

一次侧输入有功功率 P_1 、无功功率 Q_1 的数量关系如式(5)、式(6)所示。

$$P_1 = P_G - P_C \quad (5)$$

$$Q_1 = Q_G - Q_C \quad (6)$$

式中: P_G 为发电机有功功率; P_C 为高压厂用变压器有功功率; Q_G 为发电机无功功率; Q_C 为高压厂用变压器无功功率。

考虑在母线处的无功平衡关系, 则主变高压侧的无功功率 Q_2 可用式(7)表示。

$$Q_2 = Q_G - \Delta Q = Q_G - Q_C + B_T U_G^2 - \frac{(P_G - P_C - G_T U_G^2)^2 + (Q_G - Q_C + B_T U_G^2)^2}{U_G^2} X_T \quad (7)$$

文献[14-15]根据电动机详细模型经过线性化处理, 在忽略电网频率影响的情况下, 只考虑节点处无功功率和电压的关系, 则动态负荷模型如式(8)所示。

$$\Delta u(s) = \frac{1 + sT_1}{K_{\text{qu}} + sT_{\text{qu}}} \Delta Q(s) \quad (8)$$

2.2 AVC 系统仿真

将选取的云南某火电厂 AVC 试验期间的 500 kV 线路电压设定值数据作为 500 kV 线路电压仿真的设定值, 参考该电厂的设备参数和试验报告数据对模型中的参数进行计算, 求出该系统的 AVC 模型参数, 同时对 AVC 模型进行仿真验证。

500 kV 线路电压仿真效果如图 4 所示, 由于对 500 kV 线路电压和无功功率做了线性化抽象, 且没有考虑在 500 kV 线路节点处的电网无功干扰, 因此只能用电压变化趋势反映真实 500 kV 线路电压的波动情况, 因而会存在偏差, 但是这些偏差都在允许偏差的范围内。通过仿真曲线和现场试验数据的整体对比, 可以验证在该段时间内建立的云南某火电厂 AVC 系统模型比较准确。

机组无功功率仿真见图 5。

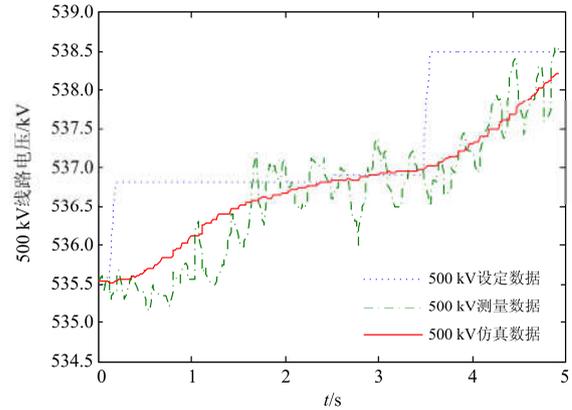


图 4 500 kV 线路电压仿真

Fig. 4 Simulation of 500 kV line voltage

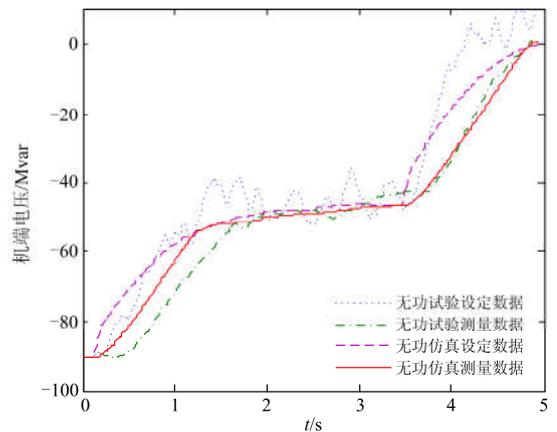


图 5 机组无功功率仿真

Fig. 5 Unit reactive power simulation

3 火电厂 AVC 系统优化

实际工程中电压采用 PID 控制, 积分的作用增

大了相位滞后,削弱了控制系统的响应速度。当参数不能及时调整适应当前工况时,可能造成系统稳定性、动态性能和抗干扰能力的下降。仿人智能控制算法以保持代替积分作用,模拟人的行为,捕捉动态变化过程中的特征信息,经过逻辑推理,实现对被控对象的有效控制,且对被控对象的数学模型精度要求很低^[16]。实际工程中的无功控制器采用“硬性”的非线性控制器,不能根据实际的调节效果随时调整,适应性比较差,而采用仿人智能控制算法可以对调节过程实现跟踪,随时调整控制策略,适应性比较强。

火电厂 AVC 系统主要在控制过程方面进行优化,采用仿人智能控制的方法对电压控制器和无功控制器进行优化设计,改善控制系统的超调量、上升时间和调节时间等动态性能指标。在考虑电网系统阻抗不变的情况下,只考虑系统无功的平衡,无功和电压的线性关系,不考虑电网无功波动的影响,只考虑 500 kV 线路电压设定值的变化。

3.1 仿人智能无功控制器的设计

云南某火电厂 AVC 系统无功控制器采用非线性控制器,实现机组的无功控制功能。机组无功控制逻辑中死区设置为 2 Mvar。在无功控制器的逻辑中,对于脉宽的控制,结合 DCS 监控系统自身的扫描周期的限制和机组容量、进相的要求,设置发出的最小脉宽为 0.1 s 和最大脉宽为 3.9 s 的要求。采用仿人智能控制算法,不仅保留了之前的非线性控制的特性,同时根据调节效果随时调整控制策略。

有关仿人智能无功控制器的算法设计如表1所示。

表 1 仿人智能无功控制器的算法设计简表

Table 1 Algorithm design of humanoid intelligent

reactive power controller

序号	条件	控制器输出
1	$ e_n \geq M_1$	$\text{sgn}[e_n]P_{\max}$
2	$ e_n \leq M_4$	0
3	$e_n \cdot \Delta e_n < 0$ 且 $M_4 < e_n < M_3$	$\text{sgn}[e_n]P_{\min}$
4	$e_n \cdot \Delta e_n > 0$ 且 $M_4 < e_n < M_3$	$\text{sgn}[e_n]K_1P_{\min}$
5	$e_n \cdot \Delta e_n > 0$ 或 $\Delta e_n = 0$, $e_n \neq 0$ 且 $M_2 < e_n < M_1$	$P_{0(n-1)} + K_1K_p e_n$
6	$e_n \cdot \Delta e_n > 0$ 或 $\Delta e_n = 0$, $e_n \neq 0$ 且 $M_3 < e_n < M_2$	$P_{0(n-1)} + K_p e_n$
7	$e_n \cdot \Delta e_n < 0$ 且 $\Delta e_n \cdot \Delta e_{n-1} > 0$ 或 $\Delta e_n = 0$	$P_{0(n)} = P_{0(n-1)}$
8	$e_n \cdot \Delta e_n < 0$ 且 $\Delta e_n \cdot \Delta e_{n-1} < 0$ 且 $M_2 < e_n < M_1$	$P_{0(n-1)} + K_1K_2K_p e_{m,n}$
9	$e_n \cdot \Delta e_n < 0$ 且 $\Delta e_n \cdot \Delta e_{n-1} < 0$ 且 $M_3 < e_n < M_2$	$P_{0(n-1)} + K_2K_p e_{m,n}$

在表 1 中,控制系统的误差为 $e = r - y$,采用离散化数字仿真后,用 e_n 表示 e 的当前采样时间的数值, r 表示机组无功设定值, y 表示机组无功被调量。在表 1 中, $\text{sgn}[e_n]$ 表示励磁的增减磁通道选择,正号表示选择增磁通道,负号表示选择减磁通道; $e_{m,n}$ 表示 e 的第 n 个极值; K_p 表示比例增益; K_1 表示增益放大系数, $K_1 > 1$; K_2 表示增益抑制系数; M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 表示设定的误差界限, M_1 表示机组无功调节的最大偏差, M_2 表示脉宽输出最小时间对应的无功偏差, M_3 表示无功调节阈值, M_4 表示无功调节死区,它们的数量关系为 $M_1 > M_2 > M_3 > M_4$; $P_{0(n)}$ 表示第 n 个周期输出量的保持值; $P_{0(n-1)}$ 表示第 $n-1$ 个周期输出量的保持值。

3.2 仿人智能电压控制器的设计

云南某火电厂 AVC 系统电压控制器采用 PID 控制策略,实现 500 kV 线路电压的调节和 500 kV 线路电压调节偏差与全厂无功设定值的转换功能。根据南方电网火电厂 AVC 考核细则的要求,对于 500 kV 线路电压的死区要求在 0.5 kV 以内,为使调节效果更好,结合优化前的死区设置,将死区设置为 0.2 kV。火电厂 AVC 系统的控制逻辑的梯度设置为 3 kV,即每两次设定值之间的差值最大为 3 kV,设置超调量最大允许为 15%,即为 0.45 kV,也在 500 kV 电压的死区要求在 0.5 kV 以内,同时作为调节的一个阈值。采用仿人智能控制算法,不仅较准确地表示电压和无功转换关系,同时可以提高调节速度和防止过度超调。

有关仿人智能电压控制器的算法设计如表 2 所示。在表中控制系统的误差为 $e = r - y$,采用离散化数字仿真后,用 e_n 表示 e 的当前采样时间的数值, r 表示 500 kV 线路电压的设定值, y 表示 500 kV 线路电压的被调量。在表 2 中, $e_{m,n}$ 表示 e 的第 n 个极值; K_p 表示比例增益; K_i 表示积分增益; K_1 表示增益放大系数, $K_1 > 1$; K_2 表示增益抑制系数, $0 < K_2 < 1$; M_1 、 M_2 、 M_3 表示设定的误差界限, M_1 表示电压调节阈值, M_2 表示考核死区内的最大动态偏差, M_3 表示电压调节死区,它们的数量关系为 $M_1 > M_2 > M_3$; $P_{0(n)}$ 表示第 n 个周期输出量的保持值; $P_{0(n-1)}$ 表示第 $n-1$ 个周期输出量的保持值;

$\sum_{i=1}^n E_i$ 为智能积分项。

表 2 仿人智能电压控制器的算法设计简表

Table 2 Algorithm design of human-simulated intelligent voltage controller

序号	条件	控制器输出
1	$ e_n \geq M_1$	$P_{0(n-1)} + K_1 K_p e_n$
2	$ e_n \leq M_3$	$P_{0(n)} = P_{0(n-1)}$
3	$e_n \cdot \Delta e_n < 0$ 且 $\Delta e_n \cdot \Delta e_{n-1} > 0$ 或 $\Delta e_n = 0$	$P_{0(n)} = P_{0(n-1)}$
4	$e_n \cdot \Delta e_n > 0$ 或 $\Delta e_n = 0, e_n \neq 0$ 且 $M_2 \leq e_n < M_1$	$P_{0(n-1)} + K_1 K_p e_n + K_1 \cdot \sum_{i=1}^n e_i$
5	$e_n \cdot \Delta e_n > 0$ 或 $\Delta e_n = 0, e_n \neq 0$ 且 $M_3 < e_n < M_2$	$P_{0(n-1)} + K_p e_n$
6	$e_n \cdot \Delta e_n < 0$ 且 $\Delta e_n \cdot \Delta e_{n-1} < 0$ 且 $M_2 < e_n < M_1$	$P_{0(n-1)} + K_1 K_2 K_p e_n + K_1 \cdot \sum_{i=1}^n e_i$
7	$e_n \cdot \Delta e_n < 0$ 且 $\Delta e_n \cdot \Delta e_{n-1} < 0$ 且 $M_3 < e_n < M_2$	$P_{0(n-1)} + K_2 K_p e_n + K_1 \cdot \sum_{i=1}^n e_i$

3.3 火电厂自动电压控制系统优化仿真

在考虑电网系统阻抗不变的情况下，只考虑系统无功的平衡、无功和电压的线性关系，不考虑电网无功波动的影响，只考虑 500 kV 线路电压的设定值的变化。采用仿人智能控制算法进行电压控制器和无功控制器的优化设计，对 AVC 控制过程进行仿真研究。

根据表 1 中控制策略，机组的无功控制器参数设置： $K_p = 0.006$ ， $K_1 = 10.147$ ， $K_2 = 0.1172$ ， $M_1 = 650$ Mvar， $M_2 = 30$ Mvar， $M_3 = 16.667$ Mvar， $M_4 = 2$ Mvar。根据表 2 中控制策略，参数设置为： $K_p = 7.401$ ， $K_1 = 14.1$ ， $K_1 = 3.1$ ， $K_2 = 0.317$ ， $M_1 = 1$ kV， $M_2 = 0.45$ kV， $M_3 = 0.2$ kV。采用机组 AVC 试验期间的数据进行单机 AVC 系统优化仿真，其 500 kV 线路电压优化效果如图 6 所示，其机组无功优化效果如图 7 所示。

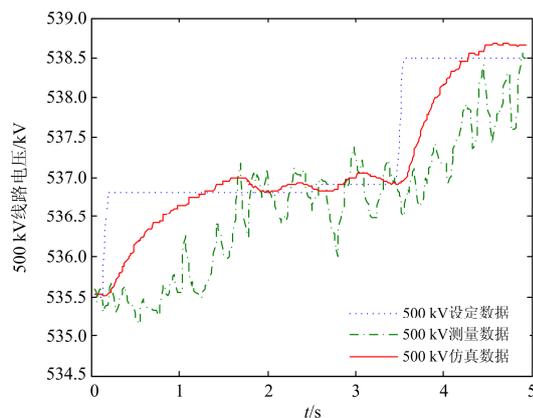


图 6 500 kV 线路电压优化效果图

Fig. 6 Diagram of 500 kV line voltage optimization effect

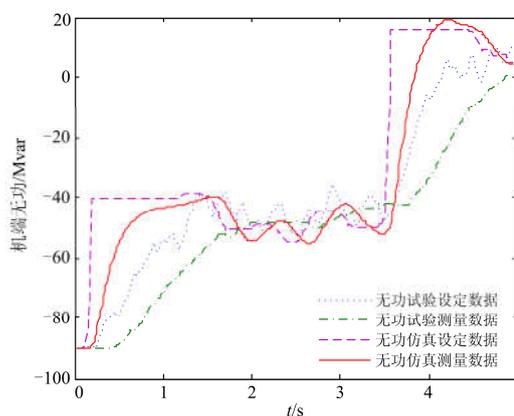


图 7 无功控制优化效果图

Fig. 7 Diagram of reactive power optimization effect

从仿真效果来看，采用仿人智能无功控制器和仿人智能电压控制器的组合控制，500 kV 线路电压的调节效果明显改善，上升时间和调节时间更短，动态偏差在调节死区内，远小于考核死区，整个调节效果更好。机组无功调节的上升时间和调节时间明显减少，超调量均在死区附近，远小于考核死区。

4 结论

为解决火电厂 AVC 系统运行和试验期间存在的问题，提高控制过程的动态性能指标，采用仿人智能电压控制器和仿人智能无功控制器相结合的控制策略，结合建立的以现场工况为基础的 AVC 系统模型进行仿真对比研究，验证了该控制策略能够大幅改善控制效果，实现了火电厂 AVC 系统的优化，为深入研究电厂侧 AVC 系统奠定了基础。

参考文献

- [1] 林捷, 王云柳, 黄辉, 等. 自动电压控制下的地区电网电压无功运行状态评估指标体系[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 123-129.
LIN Jie, WANG Yunliu, HUANG Hui, et al. Evaluation index system for voltage and reactive power state of regional power network under automatic voltage control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 123-129.
- [2] 于汀, 蒲天骄, 刘广一, 等. 电网 AGC 与 AVC 协调控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 42-47.
YU Ting, PU Tianjiao, LIU Guangyi, et al. Research on damping control system of optimization coordination of AGC and AVC[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 42-47.
- [3] 娄信明, 涂光瑜. 进化规划(EP)法在大型水电站自动电压控制(AVC)中的应用研究[J]. 电力系统及其自动化

- 化学报, 2001, 13(3): 58-60.
- LOU Xinming, TU Guangyu. The research of evolution program for automatic voltage control in hydropower station[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2001, 13(3): 58-60.
- [4] 娄信明, 盛戈皞, 罗毅, 等. 改进遗传算法在水电站自动电压控制中的应用研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(24): 41-44.
- LOU Xinming, SHENG Gehao, LUO Yi, et al. Application of improved genetic algorithm to automatic voltage control of hydropower station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(24): 41-44.
- [5] 谢锋, 王学民. 电厂侧 AVC 子站安全约束控制策略优化[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 147-149.
- XIE Feng, WANG Xuemin. Security constraints control strategy optimization of AVC sub-station system in power plant[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 147-149.
- [6] 李志恒, 付红军, 孙建华, 等. 电厂侧自动电压控制系统电压控制策略的改进[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9): 95-99.
- LI Zhiheng, FU Hongjun, SUN Jianhua, et al. Improvement on voltage control strategy used in automatic voltage control system of power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 95-99.
- [7] 翟伟翔, 周宇华, 苏适, 等. 火电厂厂级自动电压控制系统研制[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(11): 130-134.
- ZHAI Weixiang, ZHOU Yuhua, SU Shi, et al. Development of plant-level automatic voltage control system for power plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(11): 130-134.
- [8] 唐建惠, 张立港, 赵晓亮. 自动电压控制系统(AVC)在发电厂侧的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(4): 32-35.
- TANG Jianhui, ZHANG Ligang, ZHAO Xiaoliang. Application of the auto-voltage-control in power plants[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(4): 32-35.
- [9] 张金平, 张辉, 汤飞, 等. PAC-4000A 发电厂自动电压调控系统动态模拟试验[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 77-82.
- ZHANG Jinping, ZHANG Hui, TANG Fei, et al. Dynamic simulation test of PAC-4000A auto voltage control system for power plant[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(22): 77-82.
- [10] DANDENO P L, BAKER D H, SCHULG R P. Current usage and suggested practice in power system stability simulation for synchronous machines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1986, 1(1): 77-93.
- [11] 牟道槐, 华智明, 蔡增华, 等. 影响同步发电机无功-电压特性的因素分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 1997, 20(6): 11-15.
- MU Daohuai, HUA Zhiming, CAI Zenghua, et al. Factors of the effect on reactive power-voltage characteristics of synchronous generator[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 1997, 20(6): 11-15.
- [12] 夏道止. 电力系统分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [13] SACHDEV H S, SIDHU T S, WOOD H C. A digital relaying algorithm for detecting transformer winding faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 4(3): 1501-1510.
- [14] IEEE Task Force. Bibliography on load models for power flow and dynamic performance simulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(1): 523-538.
- [15] 孙博宇, 喻洁, 梅军, 等. 考虑可调负荷集群响应不确定性的联合调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 61-67.
- SUN Boyu, YU Jie, MEI Jun, et al. Joint scheduling model considering uncertainty of adjustable load cluster response[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 61-67.
- [16] 李祖枢, 涂亚庆. 仿人智能控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.

收稿日期: 2017-01-13; 修回日期: 2017-04-11

作者简介:

苏杰(1967—), 女, 教授, 硕士研究生导师, 主要研究领域为现代检测理论及其应用, 先进控制理论及其应用;

孙金龙(1988—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为火电厂自动电压控制系统的应用、建模、仿真和优化; E-mail: sunjinlong2010@163.com

刘友宽(1973—), 男, 教授级高级工程师, 长期从事水火电机组 AGC、AVC 等控制研究, 新能源控制和先进控制理论的研究。

(编辑 姜新丽)