

变电站调度中心单线图模数图一致性测试模型构建研究

邓大为¹, 刘沛林¹, 朱文², 何超林³, 夏伟³

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510620; 2. 南方电网有限责任公司, 广东 广州 510623; 3. 南方电网数字电网研究院, 广东 广州 510555)

摘要: 为提高变电站调度和自适应控制能力, 提出基于电网等效惯量特征分析的变电站调度中心单线图模数图一致性测试优化方法。分析变电站调度中心单线图的电力控制参数, 通过系统辨识模型参数识别法, 融合变电站调度中心单线图模特征分解和信息, 分析单线图模数图一致性的离散估计值。以等值机组惯量以及负荷为测试参数, 设计单线图模数图一致性测试的控制律。通过功率增量分析法, 控制变电站调度中心单线图模的等效电路优化设计和动态响应, 实现单线图模数图一致性测试模型优化设计。实验结果表明, 所设计的变电站调度中心单线图模数图一致性测试优化方法的精度较高、自适应控制能力较好, 有利于变电站的统一调度, 具有很好的大扰动抑制能力。

关键词: 变电站; 调度中心; 单线图模; 数图一致性; 扰动抑制

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed22604

Research on Consistency Test Model Construction of Single Line Diagram Module Diagram of Substation Dispatching Center

DENG Dawei¹, LIU Peilin¹, ZHU Wen², HE Chaolin³, XIA Wei³

(1. Power Dispatching Control Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510620, Guangdong, China; 2. China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510623, Guangdong, China; 3. Digital Grid Research Institute of China Southern Power Grid, Guangzhou 510555, Guangdong, China)

Abstract: In order to improve the substation dispatching and the adaptive control ability, an optimization method for consistency test of substation dispatching center single line diagram modulus diagram based on the analysis of equivalent inertia characteristics was proposed. The power control parameters of the substation dispatching center single line diagram were analyzed. By using the parameter identification method of system identification model, combining the model decomposition and the information of substation dispatching center single line diagram, the discrete estimated value of the consistency of the substation dispatching center single line diagram was analyzed. Taking the inertia and load of equivalent units as test parameters, the control law for consistency test of the single line graph modulus graph was designed. Through the power increment analysis method, the equivalent circuit optimization design and dynamic response of the substation dispatching center single line diagram model were controlled, and the consistency test model of the single line diagram module diagram was optimized. The experimental results show that the optimization method has high precision and good adaptive control ability, which is beneficial to the unified dispatching of substations and has good capability of suppressing large disturbance.

Key words: substation; dispatching center; model of the single line pattern; consistency of figures; disturbance suppression

随着智能变电站调度技术的发展, 变电站调度中心的智能规划要求越来越高, 需要构建变电站调度中心单线图模数图一致性测试模型。结合变电站调度中心单线图模数图分布,

基金项目: 南方电网有限责任公司科技项目(ZBKJXM20180006); 国家重点研发计划资助(2018YFB0904900)

作者简介: 邓大为(1975—), 男, 本科, 高级工程师, Email: guibao1130@163.com;

通讯作者: 何超林(1981—), 男, 硕士, 教授级高工, Email: hclys56@tom.com

进行变电站调度中心的优化控制,提高变电站调度和自适应控制能力。结合人工智能控制技术和参数优化估计模型,管理和测试变电站调度中心单线图模数图一致性,通过虚拟模型构造的方法,建立变电站调度中心单线图模数图一致性控制参数约束模型,实现变电站调度中心的优化管理,相关的变电站调度中心单线图模数图一致性测试技术研究受到人们的极大关注^[1]。

传统方法中,对变电站调度中心单线图模数图一致性控制和测试的方法主要有基于模糊PID的变电站调度中心单线图模数图控制测试方法、虚拟控制方法以及误差补偿调节的变电站调度中心单线图模数图一致性测试方法等^[2-3]。通过分析变电站调度中心单线图模数图的电压和功率因素参数,通过参数优化评估方法,实现变电站调度中心单线图模数图一致性测试。但该方法进行变电站调度中心单线图模数图一致性测试的可靠性不好、准确性不高。

针对上述问题,本文提出基于电网等效惯量特征分析的变电站调度中心单线图模数图一致性测试优化方法,首先分析变电站调度中心单线图的电力控制参数,分析单线图模数图一致性的离散估计值,以等值机组惯量以及负荷为测试参数,然后进行单线图模数图一致性测试的控制律设计,最后进行仿真测试分析。实验测试结果表明所提方法能够有效提高变电站调度中心单线图模数图一致性测试能力。

1 变电站调度中心单线图模参数分析

1.1 粒子群算法

为实现变电站调度中心单线图模数图一致性测试模型的构建,首先需构建电压动态平衡模型,采用动态响应特征和等效电感摄动分析方法^[4],得到变电站调度中心单线图模参数的输入端为 net_j (j 为变电站调度中心单线图模参数),通过模糊加权控制的方法,得到变电站调度中心单线图模的自适应加权系数为 x_1, x_2, \dots, x_n ,其中 n 为单线图模的数量。在变电站调度中心单线图模模糊信息权重为 $w_{1j}, w_{2j}, \dots, w_{nj}$,采用参数摄动和电流闭环控制的方法,得到电压前馈解耦函数为

$$V = s(f) + a + j \quad (1)$$

式中: $s(f)$ 为线调整权数值; a 为模糊加权控制参数。

进行变电站调度中心单线图模特征分解和信息融合,采用灵敏度加权的方法,融合变电站调度中心单线图模参数,对变电站调度中心单线图模传动参数进行信息融合^[5],根据参数摄动情况进行变电站调度中心单线图模数图一致性回归分析,得到检测统计量为

$$u = \frac{w'(n_0) + \eta'}{a} + \sum V \quad (2)$$

式中: $w'(n_0)$ 为 n_0 时刻变电站调度中心的采样电流; η' 为电压前馈参数。

设计自适应律,根据电压前馈解耦模型,得到变电站调度中心单线图模参数调度函数为

$$Y = u + \frac{s(f) + j}{\eta'} \quad (3)$$

通过求直流侧电压,得到电力控制函数为

$$y(f) = Y + [u + w'(n_0)] \quad (4)$$

分析变电站调度中心单线图的电力控制参数,通过系统辨识模型参数识别的方法^[6],得到电流残差分布权值 ω_{ij} ($i = 1, 2; j = 1, 2, 3$),变电站调度中心状态分布权值 ω_j ($j = 1, 2, 3$),异相两个开关管电容输入矢量设定为 x ,得到系统辨识模型参数为

$$p = \frac{\omega_{ij}}{\beta + E} + |\omega_j + x| \quad (5)$$

式中: β 为三相电流残差电压; E 为三相电流残差分量。

1.2 变电站调度中心单线图模特征分析

通过系统辨识模型参数识别的方法,进行变电站调度中心单线图模特征分解和信息融合^[7],分析单线图模数图一致性特征参数,得到磁密度为

$$T = \frac{F_m + A_g}{\delta} + |i_s + p| \quad (6)$$

式中: F_m 为三相电流的状态残差; A_g 为区间滑模观测参数; δ 为绕组参数; i_s 为异相两个开关管电流矢量。

分析各虚拟负荷与变电站调度参数之间的偏差为

$$f(h) = \frac{\mu_{r1} + \mu_{r2}}{l} + \sum d \quad (7)$$

式中: μ_{r1} 和 μ_{r2} 为联络线 r_1, r_2 变电站调度中心单线长度; l 为对偶变量; d 为模型参数。

设置单线长度 μ_{r1} 和 μ_{r2} 为1,则得到虚拟负荷为

$$q_i = \sum_{h=1} f(h) + (k_i + k_\beta) \quad (8)$$

式中: k_i 为联络线惩罚系数; k_β 为跨距系数。

得到变电站调度中心单线图模数图一致性估计值为

$$b(k) = q_i + \|k_i + d\| + \sum T \quad (9)$$

将虚拟负荷作为已知参数,增加联络线惩罚参数,得到负荷之比,由此得到变电站调度中心单线图模特征分析模型,根据特征辨识结果,进行变电站调度中心单线图模数图一致性分析^[8]。

2 变电站调度中心单线图模数图一致性测试优化

2.1 单线图模数图一致性控制

分析单线图模数图一致性的离散估计值,以等值机组惯量以及负荷为测试参数,设计单线图模数图一致性测试的控制律^[9-11],采用功率平衡约束的方法,得到均衡参数为

$$I = w_i + n(v) + b(k) \quad (10)$$

式中: w_i 为等值机组惯量数值; $n(v)$ 为负荷测试参数。

进一步分析变电站调度中心单线图模数图一致的平衡状态方程为

$$l(r) = \sum I + w_i + f(h) \quad (11)$$

式中: $l(r)$ 为变电站调度中心单线图模数图测试所得总的均衡参数。

通过联络线约束的方法进行变电站调度中心单线图模数图一致性反馈调节,功率平衡约束的负载阻抗 Z_r 、中线阻抗 Z_s 及端线阻抗 Z_p ,可通过如下公式计算得出:

$$Z_r = u_d + e_u + \mu_0 \quad (12)$$

$$Z_s = \frac{k + A_c}{u_d} + l(r) \quad (13)$$

$$Z_p = e_u + \frac{R + \mu_0}{Z_i} \quad (14)$$

式中: u_d 为直流参考电压; e_u 为变电站调度中心单线图模能量分布; A_c 为变电站调度中心单线图模控制的可靠性分布参数; Z_i 为变电站电子设备阻抗。

通过 Neumann 方法得到变电站调度中心单线图模控制约束参数 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$,采用电压-无功-电流三环串级控制的方法,得到系统耦合系数 $k = M/\sqrt{L_{11}L_{22}}$,其中 L_{11}, L_{12} 分别为初级、次

级电感值, M 为互感系数。 R 为端电阻,变电站调度中心单线图模^[12]表示为

$$\rho(e) = \frac{Z_r + Z_s + Z_p}{\rho} + \sum R \quad (15)$$

式中: ρ 为变电站调度中心单线图模分布的电阻率。

采用变电站调度中心单线图模数图的稳态功率 $P = VI$,系统电压波动转矩为

$$S = \sum_{e=1} p(e) + \rho(A_c + k) \quad (16)$$

通过功率增量分析的方法,进行变电站调度中心单线图模的等效电路控制^[13-14],单线图模数图一致性控制的增强模型为

$$f(\gamma) = S + e_u + \phi \quad (17)$$

式中: ϕ 为控制性能参数。

综上所述,得到单线图模数图一致性测试模型,进行电压波动调节。

2.2 变电站调度中心单线图一致性测试

构建单线图模数图一致性检测模型^[15-16],得到变电站调度中心单线图输出的基准值为

$$m_b = L_q + [U_J + U_E + f(\gamma)] \quad (18)$$

式中: L_q 为有功功率的波动; U_J 为变电站调度中心的直流偏置电压; U_E 为变电站调度中心的高压侧电压。

采用无功平抑电压波动控制的方法,得到稳态电压为

$$b(w) = \frac{L_s + L_v}{L_E} + m_b \quad (19)$$

式中: L_s 为变电站调度中心的谐波电流; L_v 为变电站调度中心的负荷波动; L_E 为微分参数。

采用无功控制平抑电压的联合控制策略,得到变电站调度中心单线图模联合控制输出为

$$G = (y_i + L_s) + \frac{f_i + b_j}{b_x} \quad (20)$$

式中: y_i 为第 i 通道的电流分量相互耦合参数; f_i 为动态耦合参数; b_j 为电流各次频率分量,通过联合耦合控制的方法,进行测量噪声分析,得到互耦参数为 b_x 。

变电站调度中心单线图模一致性测试的优化输出矩阵为

$$h(n) = \xi + \sum G + \sum_{w=1} b(w) \quad (21)$$

式中: ξ 为谐波分量。

综上所述,实现变电站调度中心单线图模数图一致性测试。

3 实验结果与分析

设计仿真实验验证本文方法在实现变电站调度中心单线图模数图一致性测试中的应用性能。假设变电站调度中心单线图模参数分布值为 25 kW,电压前馈解耦系数为 0.34,网侧等效电感 15 mH,整流器电流环闭环系数为 0.24,网侧电流为 200 A,根据上述参数设定,进行变电站调度中心单线图的一致性参数辨识,得到参数解析结果如图 1 所示,其中 $\Delta U, \Delta P$ 分别为电压、功率波动; φ 为功率因数角。

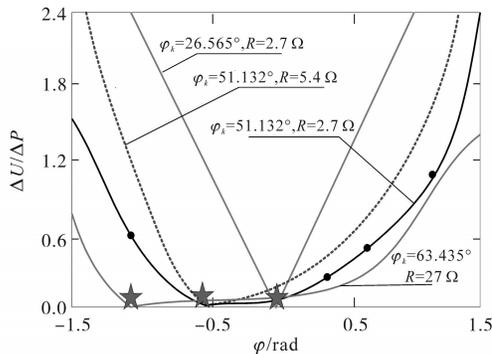


图1 变电站调度中心单线图的一致性参数解析结果

Fig.1 Analysis results of consistency parameters of substation dispatching center single line diagram

根据参数解析结果,进行变电站调度中心单线图一致性测试,得到变电站调度中心单线图测试收敛曲线如图 2 所示。

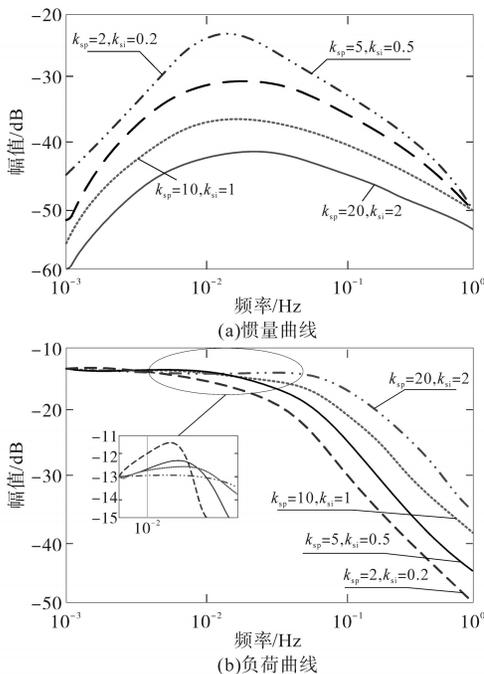


图2 变电站调度中心单线图测试收敛曲线

Fig.2 Convergence curves of single line diagram test in substation dispatching center

分析图 2 可知,本文方法能有效实现变电站调度中心单线图模一致性测试,得到负荷扰动有效值降低 12.21%,说明抗扰动能力较好。

为进一步验证所提方法的变电站调度中心单线图模数图一致性测试模型的有效性,将文献[2]方法以及文献[3]方法作为对照组,对不同方法的变电站调度中心单线图模数图一致性测试精度进行对比,结果如图 3 所示。

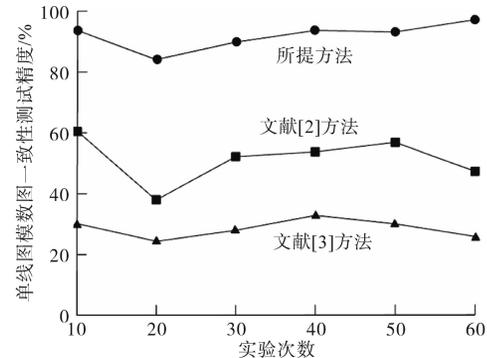


图3 不同方法单线图模数图一致性测试精度对比

Fig.3 Comparison of accuracy of single line modulus diagram consistency test by different methods

由图 3 可知,在 60 次实验迭代过程中,不同方法的单线图模数图一致性测试精度存在较大差异。所提方法的精度可保持在 80% 以上,相比之下,传统方法的单线图模数图一致性测试精度在 20%~60% 之间。以上数据表明,所提方法的应用性能优于传统方法。

4 结论

结合变电站调度中心单线图模数图分布,进行变电站调度中心的优化控制,提高变电站调度和自适应控制能力。本文提出基于电网等效惯量特征分析的变电站调度中心单线图模数图一致性测试优化方法。研究得知,所设计变电站调度中心单线图的一致性测试模型的参数解析性能较好,自适应控制能力较好,具有很好的大扰动抑制能力,为相关领域研究提供可靠依据。

参考文献

[1] 刘炜,赵成勇,郭春义.基于RHP零点限制的VSC-HVDC不同控制回路稳定性及交互作用机理分析[J].中国电机工程学报,2019,39(22):6497-6508.
Liu Wei, Zhao Chengyong, Guo Chunyi. Mechanism analysis of VSC-HVDC control loops stability and interaction based on non-minimum phase zero distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22):6497-6508.

- [2] Wang D, Liang L, Shi L, *et al.* Analysis of modal resonance between PLL and DC-link voltage control in weak-grid tied VSCs[J]. IEEE Transactions on Power System, 2019, 34(2): 1127–1138.
- [3] Wang D, Liang L, Hu J, *et al.* Analysis of low-frequency stability in grid-tied DFigs by nonminimum phase zero identification[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(2): 716–729.
- [4] Wang W, Barnes M, Marjanovic O. Stability limitation and analytical evaluation of voltage droop controllers for VSC MTDC[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(2): 238–249.
- [5] Wang W, Beddard A, Barnes M, *et al.* Analysis of active power control for VSC-HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(4): 1978–1988.
- [6] Zhou J Z, Ding Hui, Fan Shengtao, *et al.* Impact of short-circuit ratio and phase-locked-loop parameters on the small-signal behavior of a VSC-HVDC converter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2287–2296.
- [7] 荆朝霞, 陈达鹏, 谭慧娟, 等. 城市输电网最大供电能力改进 Benders 算法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(15): 4373–4384.
- Jing Zhaoxia, Chen Dapeng, Tan Huijuan, *et al.* An improved benders decomposition applied to total supplying capability problem of city transmission network[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(15): 4373–4384.
- [8] Martínez YP, Vidal C. Classification of global phase portraits and bifurcation diagrams of Hamiltonian systems with rational-potential[J]. Journal of Differential Equations, 2016, 261(11): 5923–5948.
- [9] Wang T, Chiang HD. On the number of unstable equilibrium points on spatially-periodic stability boundary[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2016, 61(9): 2553–2558.
- [10] Mahmood K, Kamal S, Khan H M. Dynamic optimization of network routing problem through ant colony optimization(ACO)[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2012, 28(5): 6296–640.
- [11] Liu Y, Gao C, Zhang Z, *et al.* Solving NP-hard problems with physisarum-based ant colony system[J]. IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics, 2017, 14(1): 108–120.
- [12] Twomey C, Stützle T, Dorigo M, *et al.* An analysis of communication policies for homogeneous multi-colony ACO algorithms[J]. Information Sciences, 2010, 180(12): 2390–2404.
- [13] 陈泰峰, 周运卓. 浅析变电站快速图模转换程序[J]. 机电信息, 2020, 20(29): 99–100.
- Chen Taifeng, Zhou Yunzhuo. Analysis of the fast graph mode conversion program of substation[J]. Electromechanical Information, 2020, 20(29): 99–100.
- [14] 刘香品, 宣士斌, 刘峰. 引入佳点集和猴群翻过程的人工蜂群算法[J]. 模式识别与人工智能, 2015, 28(1): 80–89.
- Liu Xiangpin, Xuan Shibin, Liu Feng. Artificial bee colony algorithm with good point set and turn process of monkey algorithm[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2015, 28(1): 80–89.
- [15] 夏经德, 罗金玉, 高淑萍, 等. 特高压直流输电线路差动保护改进方案[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(3): 579–588.
- Xia Jingde, Luo Jinyu, Gao Shuping, *et al.* Improved scheme for differential protection of UHVDC transmission lines[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(3): 579–588.
- [16] 于洪泽, 韩松, 陆桂军, 等. 基于 LabVIEW 与 TestStand 的关键设备自动测试系统[J]. 电气传动, 2020, 50(3): 83–86.
- Yu Hongze, Han Song, Lu Guijun, *et al.* Critical equipment automatic test system based on LabVIEW & TestStand[J]. Electric Drive, 2020, 50(3): 83–86.

收稿日期: 2020–10–30

修改稿日期: 2020–11–20

(上接第62页)

- ternal and external fault diagnosis and fault-selection of transmission line based on convolutional neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(S1): 21–28.
- [14] 林刚, 王波, 彭辉, 等. 基于强泛化卷积神经网络的输电线路图像覆冰厚度辨识[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(11): 3393–3401.
- Lin Gang, Wang Bo, Peng Hui, *et al.* Identification of icing thickness of transmission line based on strongly generalized convolutional neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(11): 3393–3401.
- [15] 高伟, 杨耿杰, 郭谋发, 等. 基于 DTCWT-DBN 的配电网内部过电压类型识别[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 80–89.
- Gao Wei, Yang Gengjie, Guo Moufa, *et al.* Internal overvoltage type identification for distribution network based on DTCWT-DBN algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 80–89.
- [16] Fu C, Si W, Huang H, *et al.* Research on a detection and recognition algorithm for high-voltage switch cabinet based on deep learning with an improved YOLOv2 network[C]//2018 11th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), IEEE, 2018: 346–350.
- [17] Pu Y, Yang H, Ma X, *et al.* Recognition of voltage sag sources based on phase space reconstruction and improved VGG transfer learning[J]. Entropy, 2019, 21(10): 999.
- [18] Guo M, Zeng X, Chen D, *et al.* Deep-learning-based earth fault detection using continuous wavelet transform and convolutional neural network in resonant grounding distribution systems[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(3): 1291–1300.

收稿日期: 2020–09–16

修改稿日期: 2020–10–16