

# 基于调度自动化系统的无功优化实用研究

薛斌, 祝云, 韦化

(广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004)

**摘要:** 无功优化(RPO)是电力系统实现无功功率最优控制, 保证电压质量的重要措施。以提高电压质量和降低网损为目标构建了一个基于电网调度自动化(SCADA)平台的无功优化系统。为了满足实际无功优化系统的要求, 从工程应用的角度, 研究了系统结构、控制方式、设备动作等解决方案。最后采用原对偶内点法对某地区232节点实际电网进行优化计算, 结果表明, 电压质量改善和网损降低是能够实现的。

**关键词:** 电力系统; 无功优化; 调度自动化; 实用方案; 原对偶内点法

## Practical study of reactive power optimization based on the dispatching automation system

XUE Bin, ZHU Yun, WEI Hua

(School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** Reactive power optimization (RPO) is the important measure to achieve the optimal control of reactive power and ensure the voltage quality. A RPO system based on the dispatching automation platform is constructed in the paper. The optimization objectives are to improve the voltage quality and reduce the network loss. In order to meet the requirements of the actual reactive power optimization system, system structure, control styles, equipment action solutions etc are studied from the perspective of engineering application. Finally, prior-dual interior point method is used to compute a 232-buses real electric power network. Results show that the voltage quality improvement and the network loss decline can be achieved.

**Key words:** power system; reactive power optimization (RPO); SCADA; practical schemes (PS); prior-dual interior point method

中图分类号: TM714; TM734 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)06-0040-04

## 0 引言

无功优化(RPO)是保证系统安全、经济运行的一项有效手段, 是降低网损、提高电压质量的重要措施。因此, 无功优化问题的研究, 既有理论意义, 又有实际应用价值。

在无功优化的应用方面, 一般是利用经验数据进行离线计算<sup>[1]</sup>, 根据计算结果调节设备, 但负荷是实时变化的, 离线计算结果很难对有载调压变压器的分接头档位调节、无功补偿设备的投切等进行有效的指导。无功优化系统在某市电网中的应用取得了一定的效果, 但是其所用的遗传算法存在收敛的不确定性, 计算效率低等诸多缺陷<sup>[2]</sup>。文献[3]使用非线性规划最优潮流法进行无功优化计算, 讨论了设备控制动作顺序的影响。某地级电网无功电压

优化集中控制系统虽然降低了网损, 但是该系统仅对有载可调变压器和电容器进行控制, 没有考虑对发电机端电压进行调节<sup>[4]</sup>。

针对上述问题, 本文全面考虑影响网损的各种因素, 从工程实用的角度研究了系统结构、控制方式、设备动作等, 探讨了如何在现有电网调度自动化系统基础上实现无功优化, 并构建了一个完整的无功优化系统, 详细阐述了各模块的功能。根据提出的实用方案, 采用原对偶内点法<sup>[5-6]</sup>对某地区232节点电网优化的结果表明电压质量提高和网损下降的目标是可以达到的。

## 1 无功优化系统解决方案

无功优化的主要目标是改善电压质量, 降低全网网损, 提高电网安全稳定水平。对于一个特定的电力系统, 既有无功优化系统构架问题, 又有亟待明确的设备调节原则问题。因此, 为了开发满足实

**基金项目:** 国家高校博士学科点专项科研基金  
(20060593002); 广西自然科学基金项目(0639007)

际需要的无功优化系统,有必要从工程应用的角度,研究各种实际问题,给出相应的解决方案。

### 1.1 无功优化系统结构

在无功优化计算前,先调用 SCADA 数据库的实时数据(各母线有功、无功以及电压)和网架基础参数,经过处理转换成所需格式的数据,再传到 RPO 的 SQL 数据库, RPO 计算完毕后,可以得到优化后的潮流数据以及明确的设备优化控制方案,调度员一目了然,操作简单快捷。

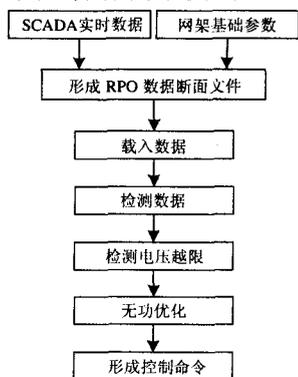


图 1 RPO 系统结构图

Fig.1 Structure of RPO system

图 1 为 RPO 系统结构图,涵盖了数据的输入、数据断面形成、数据检测、无功优化、控制命令形成等整个计算流程。

### 1.2 数据检测模块

SCADA 形成的电网实时数据每隔 10 min 刷新一下数据断面,在读入 RPO 系统前需进行数据断面检测,以确认该数据适合 RPO 系统的计算。检测内容包括以下几点:

- ① 电网基本数据检查:根据电网运行经验,检查电网基本信息的合法性,如状态估计合格率;
- ② 电网状态估计数据的拓扑分析检查;
- ③ 状态估计数据和量测值的比较。

### 1.3 电压越限检测模块

该模块是 RPO 系统中最基本、最重要的模块,它判断节点电压越限与否,是 RPO 计算的前提。如无电压越限,则是否进行无功优化,要视优化的安全经济效益而定,当无功优化设备调节费用等于甚至超过 RPO 降损收益时,无需进行优化控制,而且频繁调整电网的运行状态,不利于电网的安全稳定,也会缩短设备使用寿命。

### 1.4 无功优化和控制命令形成模块

无功优化模块是 RPO 系统的核心功能模块。通过实时状态估计获得初始状态,可周期启动、事件启动或调度员人工启动进行无功优化计算,并给出优化控制方案,实施开环或闭环控制方式。

经过无功优化模块的计算,给出系统的控制命

令,包括:①发电厂的高压母线电压;②变电站重载主变分接头档位;③电容器投切组数等。

无功优化的首要目标是电压合格,合格率≥96%,以保证供电质量;其次才是降低网损,实现电网经济运行。如果优化后网损降幅低于用户设置值,但电压合格,这时可以考虑不进行优化控制,具体方案可由用户自行选择。

## 2 RPO 系统的实现

### 2.1 系统的控制方式

系统存在开环控制和闭环控制两种运行方式。在开环控制情况下,系统给出优化方案,供调度人员参考,调度人员根据调度运行经验,在优化方案基础上进行人工控制,整个过程需要调度员的人工干预。经过一段时间的开环运行,若整个系统工作正常,可以转入闭环控制运行<sup>[7]</sup>。无功优化闭环实时控制系统如图 2 所示,当优化方案给出后,直接下达 SCADA 执行,整个过程不需要调度人员进行干预。

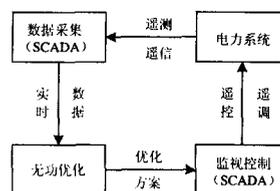


图 2 电网无功优化闭环实时控制系统结构示意图

Fig.2 Structure of closed-loop real-time control system for reactive power optimization of electric power network

### 2.2 无功优化的模型

无功优化数学模型<sup>[8]</sup>可描述为:

$$\begin{aligned} \min P_{\text{loss}} &= \sum_{i \in S_B} (P_{Gi} - P_{Di}) \\ \text{s.t. } P_{Gi} - P_{Di} &= \sum_{j \in S_B} [e_i (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + f_i (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j)] \\ Q_{Ri} - Q_{Di} &= \sum_{j \in S_B} [f_i (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + e_i (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j)] \\ \underline{Q}_{Ri} \leq Q_{Ri} \leq \overline{Q}_{Ri}, \quad i \in S_R \\ \underline{V}_i^2 \leq V_i^2 \leq \overline{V}_i^2, \quad i \in S_B \\ V_i &= \sqrt{e_i^2 + f_i^2} \\ \underline{T}_{ij} \leq T_{ij} \leq \overline{T}_{ij}, \quad (i, j) \in S_T \\ \underline{Q}_{Ci} \leq Q_{Ci} \leq \overline{Q}_{Ci}, \quad i \in S_C \\ Q_{Ci} &= B_{Ci} (e_i^2 + f_i^2) \\ \underline{P}_{ij} \leq P_{ij} \leq \overline{P}_{ij}, \quad (i, j) \in S_L \\ P_{ij} &= G_{ij} (e_i^2 + f_i^2 - e_i e_j - f_i f_j) + B_{ij} (e_i f_j - e_j f_i) \end{aligned}$$

其中:  $P_{\text{loss}}$  为有功网损;  $G_{ij}, B_{ij}$  为节点  $i, j$  间的导纳;  $e_i, f_i$  为节点  $i$  的电压  $V_i$  的实部和虚部;  $P_{Gi}, Q_{Ri}$

为节点*i*的有功和无功出力;  $P_{Di}, Q_{Di}$  为节点*i*的有功和无功负荷;  $T_{ij}$  为节点*i, j*间的可调变压器变比;  $Q_{Ci}$  为节点*i*的可投切电容器的补偿容量;  $B_{Ci}$  为可投切电容器的电纳;  $P_{ij}$  为线路传输功率;  $S_R$  为无功源集合;  $S_B$  为所有节点集合;  $S_T$  为可调变压器集合;  $S_C$  为可投切电容器集合;  $S_L$  为受约束线路集合。

### 2.3 变量处理与算法选择

本文将离散变量(变压器变比)当作连续变量处理,优化后所得的结果就近规整,再换算成相应的分接头档位;根据优化所得的无功补偿设备(电容器)的补偿容量计算相应的电容器投切组数。最后动作变压器分接头和投切电容器组,调节发电机端电压,实现无功优化。

电力系统的无功优化问题是一个多变量、多约束的大规模非线性规划问题,鉴于原对偶内点法在处理规划问题方面的独特优势,且为了满足实用无功优化在速度方面的要求,本文将作为无功优化模块核心程序的算法。原对偶内点法的详细推导过程及算法流程参见文献[6]。

### 2.4 设备动作次序方案

调节变压器变比优化无功和动作无功补偿设备优化无功的本质是不同的,由于改变变压器分接开关本身并不产生无功,而是将无功功率缺额转移到其它电网,变更无功分布,因此在电网无功不足的情况下调整变压器有载分接头,可能使主电网电压严重下降而导致电压崩溃。所以无功不足、电压过低时,应优先投入无功功率电源,然后再考虑调节变压器分接头。本文综合考虑无功控制设备的控制效力,根据就近原则,结合经济性等因素,制定设备动作次序方案如下:

(1) 负荷增大,无功不足,电压偏低时,动作次序为:投入电容器>>调节变压器分接头档位>>调节发电机端电压。

(2) 负荷减小,无功过剩,电压偏高时,动作次序为:切除电容器>>调节变压器分接头档位>>发电机进相运行。

## 3 工程实例分析

基于上述实用方案,本文在CPU为PENTIUM-IV 1.8GHz,内存为256 MB的计算机环境下,用Matlab7.1编程对某地区232节点实际电网进行无功优化研究。电压上下限为1.05~0.95,所有数据均采用标幺值。以下图表“优化前”均指普通潮流的情况,所有结果均为变量规整前的量。

表1列出了该系统的优化结果,表2列出了越限电压优化前后的值,图3为优化前后节点电压分布图,可见通过无功优化,电压总体分布趋于集中。图4给出了普通潮流网损与优化后网损的比较,图5绘制了网损随迭代次数的变化过程,图6给出了补偿间隙随迭代次数的变化过程,它以二次下降趋势衰减至给定的精度。

表1 计算时间和优化结果  
Tab.1 Optimization results and execution time

计算时间/s	网损下降幅度/(%)
3.27	10.29

表2 越限电压优化前后的值  
Tab.2 The values of beyond-limit voltage before and after optimization

	优化前	优化后	优化前	优化后	
$V_{39}$	0.946 5	1.009 2	$V_{154}$	1.081 0	1.050 0
$V_{102}$	1.068 6	1.050 0	$V_{155}$	1.084 3	1.050 0
$V_{103}$	1.085 6	1.050 0	$V_{156}$	1.078 0	1.050 0
$V_{104}$	1.073 6	1.050 0	$V_{157}$	1.080 4	1.050 0
$V_{105}$	1.082 1	1.050 0	$V_{158}$	1.052 7	1.045 9
$V_{143}$	1.079 4	1.009 2	$V_{160}$	1.050 7	1.042 9
$V_{144}$	1.052 9	1.046 2	$V_{161}$	1.052 0	1.044 4
$V_{145}$	1.052 8	1.046 1	$V_{162}$	1.051 6	1.043 7
$V_{146}$	1.052 0	1.044 4	$V_{163}$	1.052 2	1.044 9
$V_{147}$	1.052 6	1.045 9	$V_{164}$	1.157 5	1.050 0
$V_{148}$	1.051 5	1.044 9	$V_{170}$	1.159 2	1.050 0
$V_{149}$	1.052 1	1.045 3	$V_{173}$	1.052 1	1.045 4
$V_{151}$	1.051 1	1.044 3	$V_{174}$	1.051 1	1.044 4
$V_{152}$	1.056 7	1.050 0	$V_{175}$	1.051 6	1.044 9
$V_{153}$	1.052 7	1.045 9	$V_{232}$	0.930 0	1.009 1

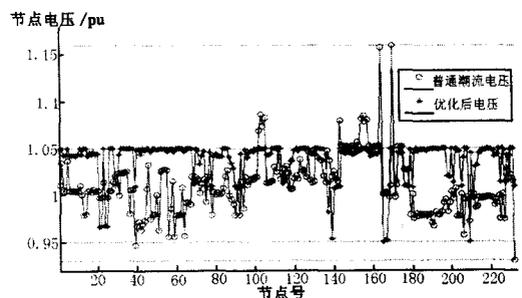


图3 优化前后节点电压分布  
Fig.3 Buses voltages distribution before and after optimization

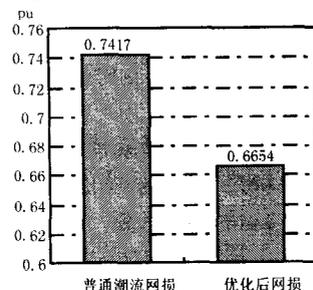


图4 优化前后的网损比较  
Fig.4 Network loss before and after optimization

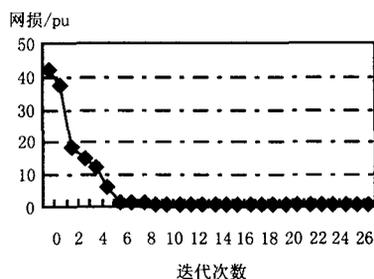


图5 网损的变化过程

Fig.5 Change of network loss with iteration

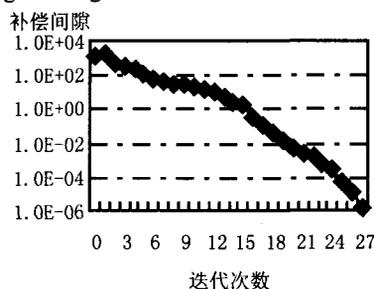


图6 补偿间隙的变化过程

Fig.6 Change of complementary gap with iteration

由表1可见, 整个系统的网损较优化前下降了10.29%, 优化节约的电能相当可观, 经济效益十分显著, 且计算时间不足4s, 完全满足在线无功优化的要求。在常规潮流中, 该系统有多处电压越限的现象, 由表2可见, 优化后电压越限节点的电压均在限定范围内, 从而保证了供电质量, 实现了系统安全经济运行。

表3、表4和表5分别给出了无功优化计算后变压器(篇幅所限, 只给出五台变压器的数据)、电容器组和发电机端电压的优化控制方案。

表3 变压器优化方案

Tab.3 The optimal schemes of transformer

变压器名	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$
优化前变比	1.002 2	0.999 1	0.999 1	1	1.026 6
优化后变比	1.025 0	0.998 0	0.997 9	1.025 0	0.996 2

表4 投入电容器组优化方案

Tab.4 The optimal schemes of capacitor banks

节点号	补偿容量×组数
39	—
69	0.2×1; 0.03×2; 0.025×1
76	0.3×1; 0.2×1; 0.03×3; 0.025×1
143	—
180	—
205	—
211	0.4×1; 0.3×1; 0.03×1; 0.025×1
228	0.03×1; 0.025×1
229	0.4×1; 0.3×1; 0.02×1
232	—

表5 发电机端电压优化方案

Tab.5 The optimal schemes of generator voltage

发电机名	V	$\delta$
$G_1$	0.966 5	0.186 2
$G_2$	0.966 7	0.532 8
$G_3$	0.967 4	0.550 2
$G_4$	0.966 8	0.413 5
$G_5$	1.050 0	4.713 0
$G_6$	1.050 0	4.820 9
$G_7$	1.050 0	4.292 1
$G_8$	1.050 0	3.428 0
$G_9$	1.048 2	0
$G_{10}$	1.050 0	4.215 2
$G_{11}$	1.050 0	0.486 1
$G_{12}$	0.982 1	0.896 9
$G_{13}$	1.013 9	0.486 1
$G_{14}$	0.953 5	0.822 1
$G_{15}$	1.050 0	1.715 6
$G_{16}$	1.050 0	1.635 3
$G_{17}$	1.050 0	0.175 6
$G_{18}$	1.050 0	6.522 9
$G_{19}$	1.050 0	6.311 1

## 4 结论

(1) 以提高电压质量和降低网损为目标构建了一个完整的基于调度自动化平台的无功优化系统, 根据实际无功优化系统的要求, 从工程应用的角度研究了系统结构、控制方式、设备动作等解决方案。

(2) 基于提出的实用方案采用原对偶内点法求解无功优化问题, 某实际电网的优化结果表明电网电压质量提高和系统网损降低是可以实现的。

## 参考文献

- [1] 钟红梅, 任震, 张勇军. 实时无功优化软件ORP的开发与应用[J]. 继电器, 2004, 32(11): 55-57.  
ZHONG Hong-mei, REN Zhen, ZHANG Yong-jun. Development and Application of Real Time ORP Software[J]. Relay, 2004, 32(11): 55-57.
- [2] 文劲宇, 江振华, 姜霞, 等. 基于遗传算法的无功优化在鄂州电网中的实现[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(2): 45-47, 60.  
WEN Jin-yu, JIANG Zhen-hua, JIANG Xia, et al. Genetic Algorithm Based Reactive Power Optimization and Its Application in Ezhou City Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(2): 45-47, 60.
- [3] 潘蕾蕾, 刘俊勇. 考虑控制动作顺序影响的地区电网无功优化实时控制系统的研究[J]. 电工技术学报, 2005, 20(2): 110-118.

(下转第56页 continued on page 56)

截止频率典型值为 30 Hz 的谐波检测效果如图 7 所示, 算得  $PDE=3.32 \times 10^{-3}$ 。

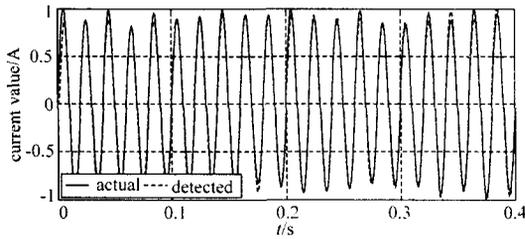


图 8 改进低通滤波器的基波电流检测性能  
Fig.8 Performance of PQ method(improved LPF)

算得  $PDE=2.05 \times 10^{-3}$ , 改进低通滤波器误差约为改进前的 2/3, 在电网电流处于瞬态时, 使用 LPF1 (80 Hz), 在稳态时使用 LPF2 (20 Hz), 因此改进低通滤波器兼具两种滤波的共同优点, 相比使用截止频率典型值为 30 Hz 的低通滤波器具有较好的检测效果。

#### 4 结论

本文通过统计理论中的假设检验方法, 判断电网电流的暂态或瞬态, 根据不同的状态, 切换两种截止频率的低通滤波器, 仿真结果证明, 这种使用自动切换的低通滤波器的谐波检测方法与传统瞬时无功功率谐波电流检测方法相比, 该方法简单易行,

在一定程度上兼顾了动态速度与检测精度。实现时只需存储两组 LPF 系数, 与一个周期的采样值 (用于电流瞬态、暂态判断), 无需增加额外的硬件与软件开销。

#### 参考文献

[1] Akagi H, Kanazawa Y, Nabae A. Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-phase Circuits[A]. In: Proc 1983 Inf Power Electronics Conf[C]. Tokyo(Japan): 1983.

[2] Akagi H. New Trends in Active Filters for Power Conditioning[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1996, 32(6): 1312-1322.

[3] 王群,姚为正,王兆安. 低通滤波器对谐波检测电路的影响[J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(4): 5-8. WANG Qun, YAO Wei-zheng, WANG Zhao-an. Effect of Low Pass Filter on Harmonics Detection Circuit[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1999, 33(4): 5-8.

收稿日期: 2008-05-08; 修回日期: 2008-06-04

#### 作者简介:

耿涛 (1981-), 男, 博士生, 主要从事有源滤波和电能质量控制技术研究; E-mail: gengtao@smail.hust.edu.cn  
赵金 (1967-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为运动控制系统理论与应用、智能控制理论与应用。

(上接第 43 页 continued from page 43)

PAN Lei-lei, LIU Jun-yong. Investigation of Regional Real-Time Var Optimization Control System Considering the Impact of the Order of Control Actions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(2): 110-118.

[4] 丁晓群, 陈晟, 许杏桃, 等. 全网无功电压优化集中控制系统在泰州电网的应用[J]. 电网技术, 2000, 24(12): 21-23, 44. DING Xiao-qun, CHEN Cheng, XU Xing-tao, et al. Application of Optimization and Centralized Control System for Reactive Power/Voltage in Taizhou Power Network[J]. Power System Technology, 2000, 24(12): 21-23, 44.

[5] Karmarkar N K. A New Polynomial-time Algorithm for Linear Programming[J]. Combinatorica, 1984, (4): 373-395.

[6] Wei H, Sasaki H, Yokoyama R. An Application of Interior Point Quadratic Programming Algorithm to Power System Optimization Problems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(1): 260-267.

[7] 郭庆来, 吴越, 张伯明, 等. 地区电网无功优化实时控制系统的研究与开发[J]. 电力系统自动化, 2002,

26(13): 66-69.

GUO Qing-lai, WU Yue, ZHANG Bo-ming, et al. Research and Development of Real-Time Control System for Reactive Power Optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(13): 66-69.

[8] 许文超, 郭伟. 电力系统无功优化的模型及算法综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(1): 100-104. XU Wen-chao, GUO Wei. Summarize of Reactive Power Optimization Model and Algorithm in Electric Power System[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2003, 15(1): 100-104.

收稿日期: 2008-05-01; 修回日期: 2008-06-05

#### 作者简介:

薛斌 (1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统最优化理论及应用; E-mail: xuebin00052229@gmail.com  
祝云 (1974-), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向为电力系统最优化理论及应用;  
韦化 (1954-), 男, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为电力系统最优运行与规划, 涉及电力市场、电力系统分析与计算、最优潮流、水火电力系统最优潮流、电压稳定、状态估计、网络与分布计算等。