

实时无功优化研究及其在线实现

赵美莲¹, 赖业宁², 刘海涛¹, 陈天华², 杜磊²

(1. 南京工程学院电力系, 江苏 南京 211167; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 210061)

摘要: 分析了无功调节对系统的影响和无功补偿设备的调节特性, 讨论了实时无功优化的应用特点及其在线应用的相关影响因素。建立了以有功网损最小为目标, 电压与无功越限为罚函数的无功优化数学模型。然后, 按EMS的在线应用要求设计了实时无功优化软件的体系结构, 优化求解上采用了一种具有分解-协调效能的协同进化算法。最后用一个实际电网进行了算例分析, 以验证其可行性与有效性。

关键词: 实时无功优化; 在线实现; 协同进化; 工程实用化

Study on real-time reactive power optimization and its on-line application

ZHAO Mei-lian¹, LAI Ye-ning², LIU Hai-tao¹, CHEN Tian-hua², DU Lei²

(1. Nanjing Industry and Technology University, Nanjing 211167, China;

2. NARI Technology Development Co., Ltd, Nanjing 210061, China)

Abstract: The influences and characteristics of reactive power adjustment on power system are analyzed in this paper. Some specialties and effect factors of real-time reactive power optimization are also discussed. An optimal mathematic model of reactive power is founded according to minimization active power loss with penalty function of voltage and reactive power restriction. Software framework of real-time reactive power optimization is designed by the on-line application requirement of EMS. The co-evolution method is adopted to solve reactive power optimization. In the end, a simulation of actual electric power grid is performed for proving feasibility and validity.

Key words: real-time reactive power optimization; on-line implement; co-evolution; engineering application

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)23-0079-05

0 引言

随着电力系统向大机组、大电网、超/特高压和远距离输电发展, 现代电网越来越复杂, 无功优化与控制问题更具挑战性。全网无功优化能够改善电压质量、减少网损, 协调电力系统运行的安全性与经济性, 因而备受人们关注, 出现了大量的算法研究^[1,2], 并且有了不少的工程应用^[3,4]。但现有实用化效果看, 存在着优化效果不大理想、方案可执行性差、对运行方式的适应性不强等问题。

新一代EMS朝着全局优化实时闭环控制的方向发展, 更强调了应用软件的实时性和在线分析与决策^[5]。因此, 需要基于无功优化机理, 结合电网实情, 进行更为深入的算法研究与工程设计。本文分析了无功调节对系统的影响和无功补偿设备的调节特性, 讨论了实时无功优化的应用特点及其在线应用的相关影响因素。然后, 按EMS的在线应用要求设计了实时无功优化软件的体系结构, 优化求解

上采用了一种具有分解-协调效能的协同进化算法。

1 无功调节对系统的影响及其调节特性

1.1 无功调节对系统的影响

1.1.1 对供电质量的影响

无功补偿是保证电压质量的一项重要措施。电网运行电压受到运行方式及负荷的影响, 大负荷方式对无功的需求量大, 若得不到及时补偿会导致电压降低, 反之, 负荷较小时电压会升高, 甚至超出其规定范围。因此, 合理地投运补偿电容来提高大负荷时的系统电压, 而切除补偿电容或投运电抗器来降低小负荷时的系统电压, 使得各负荷点电压运行于正常范围内。

1.1.2 对运行网损的影响

电力系统的运行网损由输电线路、变压器及其它输配电设备的电能损耗组成, 它取决于相应时间段内运行参数和设备参数, 可通过采取一些有效的技术措施来降低损耗。

在负荷端进行容性无功补偿,可以减少输电线路、变压器等设备输送的无功功率,从而减少了流过这些设备的电流,也就减少了系统的运行网损。

1.1.3 对输送容量的影响

在负荷点就地补偿无功功率,减少电网无功传输,在同等的视在功率下可以增加有功功率传输,相应地提高了电力设备的有功输送能力。

1.2 无功补偿设备的调节特性

1.2.1 并联电容器

并联电容器是最广泛应用的无功补偿设备,既可集中使用,又可分散装设,且单位容量投资小。

系统负荷特性常表现为感性,因此需要吸收无功。若大量负荷无功通过远距离输送,这一方面使得母线电压偏低,造成电压合格率下降;另一方面增大了运行网损。应在电压偏低时尽可能地投入并联电容器,就地补偿负荷无功以提升了电压水平。

1.2.2 并联电抗器

并联电抗器是吸收无功功率的设备。随着超高压远距离架空线和电缆线的日益增多,线路充电无功过剩问题凸现。装设必要的补偿电抗器可以防止过多的无功功率而造成的电压过高或无功窜动。

1.2.3 同步调相机

同步调相机是一种专门设计的无功源,过励时向电网提供感性无功,欠励时从电网吸收感性无功。它调节范围大,调节性能好,能起到支撑电压的作用。但投资大,运行维护较复杂,动态调节响应慢,且增加电网短路容量,这限制了其应用。

1.2.4 静止无功补偿器

静止无功补偿装置是由并联电容器、电抗器及监测与控制系统组成。它既能发出无功也能吸收无功,调节速度快,运行可靠、维护方便,但目前造价较高。

1.2.5 可调档变压器

可调档变压器是最常见的调压设备。通过调整变压器分接头位置,改变绕组线圈数目,直接调整变压器输出功率的电压。分有载调压和无载调压两种。

1.2.6 同步发电机

同步发电机正常运行时,既可发出有功功率又可发出一定量的无功功率。它一般都配备自动调压功能,通过改变发电机励磁,调整机端电压和无功功率的输出,保证电压在正常范围内。

2 实时无功优化的应用特点及影响因素

2.1 实时无功优化的应用特点

与离线分析相比,实时无功优化主要特点表现

在:

1) 数据源

离线分析是基于一个或若干个典型数据断面,其结果仅能反映个案,局限性大。而在线无功优化基于电网的实时运行数据,取SCADA经过状态估计后的计算结果作为数据源,能动态反映实时系统工况,支持了实时调度决策。

2) 收敛性

离线分析针对特定数据断面,可以不断调整算法程序,其收敛效果较理想。而在线无功优化需要适应各种各样的实时数据断面,这对算法收敛性要求更高,且应具备在潮流不可行情况下有效的预防控制或校正控制措施。

2.2 实时无功优化的影响因素

影响实时无功优化性能的因素是多方面的,在线应用时主要体现为:

1) 量测质量

系统的实时量测数据应当尽量准确。直采量测比较容易满足这一要求,而转发量测需要保证转发信息的准确性和完备性。

2) 模型参数

当模型参数存在误差时,网络分析模型与实际电网模型存在差异,这影响了无功优化的基础模型的正确度。因此要求网络拓扑及其参数必须准确,EMS日常维护应经常检查模型参数,一旦发现错误须即时改正。

3) 状态估计

在线无功优化取状态估计的实时断面进行分析。当状态估计遥测合格率比较低时(低于90%),这表明系统量测存在较大误差,即网络分析所研究的数据断面与实际电网运行断面存在较大误差。这会导致无功优化不易收敛,即便收敛其优化结果也不合理。

4) 优化算法

所采用的优化算法应适应区域分布、就地平衡的无功运行特点,尽量避免大规模的调压控制而造成的算法不收敛。

3 无功优化的数学模型

在线无功优化是在实时运行方式下通过改变发电机/调相机的无功出力(或相应节点电压幅值)、有载调压变压器分接头档位或无功补偿设备(包括并联电容器和电抗器的投入容量),满足系统运行的各种约束条件且使得电压合格率最高、有功运行网损最小。

本文以网损最小为目标,电压及无功越限为罚

函数, 建立了式 (1) 所示的扩展目标函数:

$$\min F = \Delta P + \sum_{i=1}^{n_1} \lambda_{V_i} \Delta V_i^2 + \sum_{i=1}^{n_2} \lambda_{Q_i} \Delta Q_i^2 \quad (1)$$

式中: 右边第一项为系统的有功网损; 第二项为节点电压越限的罚函数, n_1 为 PQ 节点个数; 第三项为 PV 节点发电机无功越限的罚函数, n_2 为 PV 节点个数。

电压与无功的越限值定义为:

$$\Delta V_i = \begin{cases} V_i - V_{i \max} & (V_i > V_{i \max}) \\ 0 & (V_{i \min} \leq V_i \leq V_{i \max}) \\ V_{i \min} - V_i & (V_i < V_{i \min}) \end{cases} \quad (2)$$

$$\Delta Q_i = \begin{cases} Q_i - Q_{i \max} & (Q_i > Q_{i \max}) \\ 0 & (Q_{i \min} \leq Q_i \leq Q_{i \max}) \\ Q_{i \min} - Q_i & (Q_i < Q_{i \min}) \end{cases} \quad (3)$$

功率平衡约束方程为:

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_{Gi} - P_{Li} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ \Delta Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li} + N_{ci} \Delta Q_{ci} - N_{Li} \Delta Q_{Li} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别为节点 i 的有功和无功发电功率; P_{Li} 、 Q_{Li} 分别为节点 i 的有功和无功负荷功率; ΔQ_{ci} 、 ΔQ_{Li} 分别为补偿节点 i 电容器和电抗器的每组补偿功率; N_{ci} 、 N_{Li} 分别为补偿节点 i 电容器和电抗器的投入组数。

不等式约束为:

$$\begin{cases} V_{Gi \min} \leq V_{Gi} \leq V_{Gi \max} \\ N_{ci \min} \leq N_{ci} \leq N_{ci \max} \\ N_{Li \min} \leq N_{Li} \leq N_{Li \max} \\ T_{ij \min} \leq T_{ij} \leq T_{ij \max} \\ Q_{Gi \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi \max} \\ S_{ij} \leq S_{ij \max} \end{cases} \quad (5)$$

式中: V_{Gi} 、 N_{ci} 、 N_{Li} 、 T_{ij} 分别为各发电机端电压, 补偿电容器的投切组数, 补偿电抗器的投切组数, 有载调压变压器调节变比, 是控制变量; Q_{Gi} 、 S_{ij} 表示发电机/调相机的无功出力 and 支路通过功率, 是状态变量。

4 软件实现

4.1 体系结构

作为 EMS 的一个高级应用模块, 实时无功优

化软件从状态估计或调度员潮流拷贝电网网络结构、母线负荷及出力等实际数据, 从实时库中解析可控变压器、可控电容/抗器和可控机组等控制变量, 从操作画面接受控制参数改变, 并将这些数据统一存放到无功优化计算库中, 经过优化计算, 再将优化结果映射到实时库中, 然后在画面上实时刷新。软件体系结构及其模块流程如图 1 所示。

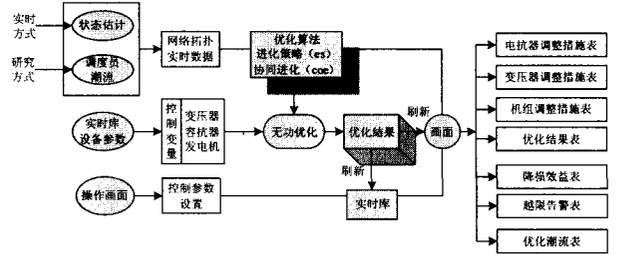


图 1 无功优化软件的模块流程

Fig.1 Model flow of reactive power optimization

4.2 协同进化算法

在线无功优化的求解难度主要在: ①目标函数的非线性; ②约束条件的多样性; ③连续量与离散量的混合控制; ④大规模系统的实时要求。

本文采用了一种满足无功优化工程应用的协同进化算法^[6], 它在传统进化算法的基础上引入生态系统的概念, 将待求解的问题映射为相互作用的各物种组成的生态系统, 以生态系统的进化来达到优化目的。该方法思想与无功优化问题的结构性相一致^[7], 因而能较好地解决了上述的求解困境。

对于大范围无功优化问题, 协同进化法采用分解-协调的思想来处理: 首先将复杂的无功优化问题

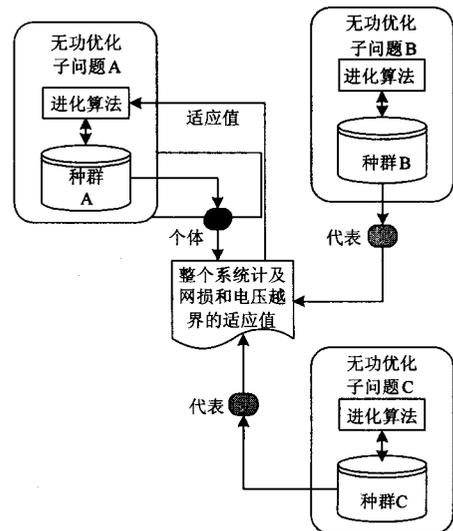


图 2 协同进化算法示意图

Fig.2 Sketch map of co-evolution method

分解为一系列相互作用的子优化问题，每个子优化问题对应于生态系统的一个物种，这些物种的遗传过程是互相隔离的，即个体只与其所属物种的其他个体进行交叉操作，而各物种间通过共同的系统模型相互作用，各物种共同进化，相互合作，从而完成生态系统整体的进化。

协同进化思想将大规模非线性的无功优化问题分解为较小范围内无功优化问题。这样简化了搜索空间，提高全局寻优的能力，避免过早的陷入局部最优解。图 2 给出了协同进化算化的一个算法示意。

5 工程实例

以我国西部某实际电网为例进行实时无功优化的算例分析。

该电网是以 330 kV 电压等级为主网架而连接西部四省(区)的区域电网。至 2005 年底，750 kV 线路 1 条，330 kV 线路 154 条，220 kV 线路总计 139 条，跨省联络线 18 条。总装机容量 28 670.8 MW，其中火电装机容量 19 377 MW，占总容量的 67.58%，水电装机容量 9 593.8 MW，占总容量的 32.42%。750 kV 变电站共计 2 座，330 kV 变电站共计 60 座，220 kV 变电站共计 59 座。

5.1 系统负荷、优化前后的系统总有功发电

图3给出了某典型日的实测负荷曲线、优化前系统总有功功率(实测发电)，以及优化后的系统总有功功率。

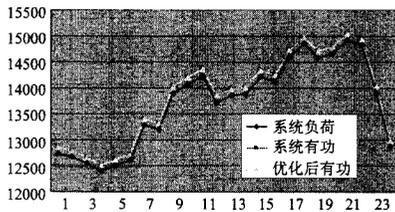


图3 实测负荷、优化前后系统有功发电

Fig.3 System load and active power before and after optimization

从图3可以看出，该典型日内电网的负荷变化呈现双峰态势，早高峰出现在7:00~12:00之间，晚高峰出现在18:00~22:00之间，最大负荷出现在20:00左右，最小负荷出现在4:00左右。

优化后有功发电曲线略低于实际发电曲线，这说明：①无功优化能够降低系统网损；②网损降低幅度不大，系统当前处于相对经济的运行状态。

5.2 效益分析

实时优化电网各时段的有功及线损。表 1 给出各时段功率及降损效益分析的统计结果，表 2 给出了日统计结果。

表 1 各时段功率及降损效益分析

Tab.1 Analysis of power and line loss in each hour

时段	负荷 /MW	有功/MW		线损率/(%)		降损率 / (%)
		优化前	优化后	优化前	优化后	
1	12 735.1	12 854.3	12 850.4	0.927 3	0.897 2	0.030 1
2	12 676.9	12 788.8	12 783.8	0.875 0	0.836 2	0.038 8
3	12 544.5	12 655.8	12 653.9	0.879 4	0.864 6	0.014 9
4	12 396	12 513.6	12 510.4	0.939 8	0.914 4	0.025 3
5	12 497.2	12 613.4	12 612.7	0.921 2	0.915 7	0.005 5
6	12 601.1	12 714.3	12 712.6	0.890 3	0.877 1	0.013 3
7	13 280.1	13 404	13 402.2	0.924 4	0.911 0	0.013 3
8	13 194.8	13 329.6	13 327.1	1.011 3	0.992 7	0.018 6
9	13 897.1	14 032.8	14 031.9	0.967 0	0.960 7	0.006 4
10	14 069.7	14 218.1	14 215.3	1.043 7	1.024 2	0.019 5
11	14 224.5	14 371.7	14 367	1.024 2	0.991 9	0.032 4
12	13 718.2	13 875.6	13 872.3	1.134 4	1.110 8	0.023 5
13	13 854.1	13 993.3	13 990.4	0.994 8	0.974 2	0.020 5
14	13 892.2	14 013.6	14 013.6	0.866 3	0.866 3	0.000 0
15	14 220.9	14 344.8	14 340.7	0.863 7	0.835 4	0.028 3
16	14 135.5	14 260.2	14 258.4	0.874 5	0.861 9	0.012 5
17	14 606.9	14 735.8	14 730.9	0.874 7	0.841 8	0.033 0
18	14 858.7	14 992.2	14 987.5	0.890 5	0.859 4	0.031 1
19	14 584.2	14 714	14 713	0.882 2	0.875 4	0.006 7
20	14 672.4	14 800	14 797.8	0.862 2	0.847 4	0.014 7
21	14911.2	15 040.9	15 040.1	0.862 3	0.857 0	0.005 3
22	14826.3	14 952.2	14 949.2	0.842 0	0.822 1	0.019 9
23	13912.4	14 039.2	14 036.4	0.903 2	0.883 4	0.019 8
24	12 868	12 992.7	12 989.4	0.959 8	0.934 6	0.025 2

表 2 日降损效益统计

Tab.2 Analysis of line loss in a day

	优化前线	优化后线损	降损率 / (%)
	损率/(%)	率/(%)	
日最大值	1.134 4	1.110 8	0.038 8
日最小值	0.842 0	0.822 1	0.000 0
日平均值	0.905 4	0.878 1	0.027 3

从上述两个表中数据可以得出：

- 1)实时无功优化能动态给出在各时段的优化结果，为运行人员提供了在线决策支持；
- 2)全天 24 个时段基本上都给出了更优的运行方式降低网损；
- 3)日实际平均线损率 0.9054%，优化后线损率 0.8781%，降损率 0.0273%，系统基本处于经济运行状态。

5.3 电压质量分析

分析各个时段无功优化对系统电压的影响。图4给出了该电网 330 kV 主网架 24 小时无功优化前后的平均电压。

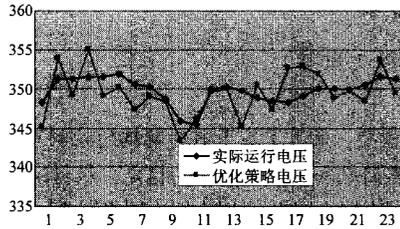


图4 330 kV 主网各时段无功优化前后的电压

Fig.4 Voltage before and after reactive power optimization on 330kV grid

从图4 可看出:

- 1) 优化策略电压为实际运行提供了电压调整趋势;
- 2) 夜间轻负荷时段, 电压运行水平偏高, 此时系统呈现容性状态, 适当补偿感性无功, 降低电压, 能够提高系统效益;
- 3) 晚间重负荷时段, 系统呈现感性状态, 适当补偿容性无功, 提高系统电压, 能够提高系统效益。

6 结语

根据无功调节对系统的影响和无功补偿设备的调节特性, 结合实时无功优化的应用特点及其影响因素, 按 EMS 的在线应用要求设计了实时无功优化软件的体系结构, 并采用了一种具有分解-协调效能的协同进化算法。实际电网的仿真分析表明实时无功优化的在线应用能为电网的在线决策提供支持。

参考文献

- [1] Urdanta A J, Gomez J F, Sorrentino E, et al. A Hybrid Genetic Algorithm for Optimal Reactive Power Planning based upon Successive Linear Programming[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(4): 1292-1298.
- [10] YUAN Zhen-hai. A Study on Zero Sequence DC Selective Electric Leakage Failure Diagnosis & Protection Principle [A]. in:2004 IEEE Montreal

- [2] 刘玉田, 马莉. 基于 Tabu 搜索方法的电路系统无功优化[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(2): 61-64.
- [3] Sharif S S, Taylor J H, Hill E F, et al. Real-time Implementation of Optimal Reactive Power Flow[J]. IEEE Power Engineering Review, 2000, 20(8):47-51.
- [4] 丁晓群, 邓勇, 黄伟, 等. 基于遗传算法的无功优化在福建电网的实用化改进[J]. 电网技术, 2004, 28(16): 44-47.
DING Xiao-qun, DENG Yong, HUANG Wei, et al. Practical Improvement of Reactive Power Optimization based on Genetic Algorithm in Fujian Power System[J]. Power System Technology, 2004, 28(16): 44-47.
- [5] 张伯明, 孙宏斌, 吴文传. 3 维协调的新一代电网能量管理系统[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(13):1-6.
ZHANG Bo-ming, SUN Hong-bin, WU Wen-chuan. New Generation of EMS with 3-Dimensional Coordination[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(13):1-6.
- [6] Potter M A, De Jong K A. Cooperative Coevolution: an Architecture for Evolving Coadapted Subcomponents[J]. Evolutionary Computation, 2000,8(1): 1-29.
- [7] 王建学, 王锡凡, 陈皓勇, 等. 基于协同进化法的电力系统无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 125-129.
WANG Jian-xue, WANG Xi-fan, CHEN Hao-yong, et al. Reactive Power of Optimization based on Cooperative Coevolutionary Approach[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 125-129.

收稿日期: 2008-03-18; 修回日期: 2008-05-25

作者简介:

赵美莲 (1976-), 女, 硕士, 讲师, 主要从事电力系统分析, 高电压技术的教学与科研工作; E-mail: zhaomeilian@126.com

赖业宁 (1975-), 男, 博士, 工程师, 主要从事电力系统分析, 电压稳定及优化潮流方面的研究开发和工程化工作。

(上接第 50 页 continued from page 50)

CHEN Yue-yun, QIN Jian, et al. A Survey on Fault Location for Distribution Network[J]. Power System Technology, 2006,30(18):89-93.

- [10] YUAN Zhen-hai. A Study on Zero Sequence DC Selective Electric Leakage Failure Diagnosis & Protection Principle [A]. in:2004 IEEE Montreal

Section Conference on Dynamics Instrumentation and Control[C].Nanjing(China):2004.

收稿日期: 2008-12-08; 修回日期: 2009-02-11

作者简介:

徐铮 (1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向电力系统保护。E-mail: xuzheng0206@163.com