

# 输电线路检修计划的优化算法综述

林海华, 李卫东

(大连理工大学电气工程与应用电子技术系, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 目前人工编制检修计划的方法, 无法综合考虑输电线路检修的可靠性和经济性, 而优化算法可以实现两者的平衡。该文综述了国内外输电线路检修计划优化算法的研究现状, 介绍了该算法的两种类型即输电与发电联合和输电线路单独编制检修计划的优化算法。前者重点介绍了基于 Benders 分解的算法和灵敏度分析法, 后者主要有基于 Benders 分解和基于可靠性评估的两种算法。对四种算法分析比较后, 提出今后的研究方向应为从实用化的角度改进算法的计算效率和收敛性。

**关键词:** 输电线路; 检修计划; 优化算法; Benders 分解; 可靠性

**中图分类号:** TM755 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)14-0087-05

## 0 引言

系统元件检修的目的是为了提高系统的可靠性, 但元件由于检修处于退出运行的状态时, 会潜在地降低检修期间系统运行的可靠性。在电力系统中, 发电、输电、配电和用电四个环节都要进行检修, 目的是提高系统的可靠性和电能的使用效率。

发电机组停机检修直接影响电网的总发电功率, 并且会影响到机组组合、水电计划、交换计划、燃料计划等, 对电力系统可靠性和经济性有着重大影响。因此, 发电机组的检修最先得到重视, 已有近三十年的研究历史; 其检修方式有: 事后检修、计划检修、改进性检修、状态检修<sup>[1]</sup>等。其中计划检修能够保证统一计划停电管理, 最大限度地避免重复停电, 已成为一种常用的有效方法。目前发电机组检修计划的研究已取得一定成果, 提出了多种检修计划的优化算法如等备用法<sup>[2]</sup>、等风险度法<sup>[3]</sup>、遗传算法<sup>[4]</sup>、动态规划法<sup>[5,6]</sup>、整数规划法<sup>[7,8]</sup>、Benders 分解法<sup>[9,10]</sup>等。

随着电力工业的改革尤其是电力市场的引入, 从商业运营的角度将发电、输电和配电的主要功能分解为相互独立的实体, 成为必然的趋势。在解除管制的电力系统环境下, 出现了许多新的研究课题。输电线路检修计划的优化问题便是其中之一。输电线路检修计划的主要目标是保证电能的输送且避免能源浪费。在电力市场下, 输电线路检修计划的编制不仅要考虑与发电、配电设备检修的配合, 而且要兼顾输电部门的自身利益。因此, 为了实现检修的可靠性和经济性的综合优化, 必须研究如何合理地编制输电线路的检修计划。

在我国, 输电线路的检修计划长期以来都是根据经验粗放地进行安排, 结果多数检修项目还是采用事后检修方式, 难以保证运行中的设备安全地运行, 而且还大量占用了线路停电时间。目前的检修计划优化算法, 一方面, 由于做了很多数学上的近似和简化, 很难适应电网运行的复杂变化。另一方面, 实际中任一未预测到的情况的出现, 都可能要对已产生的检修方案给予修正, 这要求有相应的硬件和软件, 从而限制了优化算法的应用。随着我国电网软硬件条件的改善, 输电线路检修计划优化算法的应用空间越来越大。同时, 我国电力系统市场化以后, 根据经验人工编制的检修计划, 无法综合优化检修的可靠性和经济性。所以, 从实际需要和实用化的角度来说, 对输电线路检修计划的优化算法进行深入研究是势在必行的。

输电线路检修计划的研究刚刚起步, 研究人员借鉴发电机组检修计划的研究方法, 逐渐找到了输电线路检修计划问题的研究突破点, 提出了一些输电线路检修计划的优化算法。但是还需要从实用化的角度继续深入研究, 使输电线路检修计划的优化算法逐渐完善。

## 1 算法研究介绍

目前, 输电线路检修计划的优化算法可分为输电与发电联合编制检修计划的优化算法和输电线路单独编制检修计划的优化算法两种类型。前者主要用于发、输电组合系统, 有基于 Benders 分解的发电检修计划优化算法和灵敏度分析法两种算法; 后者主要用于解除管制的电力系统中, 包括基于 Benders 分解的输电线路检修计划优化算法和基于

可靠性评估的输电线路检修计划优化算法两种算法。检修计划的优化算法与所采用的数学模型密切相关,因此以下先概述检修计划的一般性数学模型再对四种算法进行分析比较。

### 1.1 检修计划模型

用数学语言描述,检修计划实际上是一个多目标、多约束的优化问题,但由于该问题的复杂性,一般难以建立统一标准的数学模型和优化算法。在实际应用中,通常只选择一个优化指标作为目标函数,在约束中再考虑其它特定要求<sup>[11]</sup>。

根据检修计划的优化指标,检修计划模型的目标函数分为可靠性目标和经济性目标两类。

可靠性目标是以可靠性指标为目标函数,将在线路检修中断期间,与系统的安全可靠运行有关的问题,如:线路过负荷,电压波动,输电转移等,转化为目标函数。通常是通过可靠性评估得到可靠性指标,如:电量不足期望 EENS,负荷供应能力 LSC,电力不足概率 LOLP<sup>[12]</sup>等,选取一个指标作为目标函数。经济性目标是以经济费用为目标函数。经济费用包括检修费用和输电中断损失。在电力市场下,输电中断损失指中断有功功率导致的收益损失和中断或从辅助服务购买无功功率导致的收益损失。

根据约束源的不同,约束条件可分为两大类:一是检修约束,二是网络约束。

检修约束包括:检修期间约束,指检修必须在一个给定的时段(Window)内进行;检修活动的连续性,指检修开始后必须在同一个连续的时段内完成;检修力量约束,指同一检修工作队只能同时检修一台机组或一条线路;资源约束,指检修所需资源是有限的。网络约束包括:系统或母线功率平衡方程,支路潮流方程,线路容量限制和切负荷约束。

### 1.2 基于 Benders分解的发输电检修计划优化算法

该算法<sup>[13~15]</sup>以经济性目标作为数学模型的目标函数,在约束条件中考虑可靠性指标。考虑到发电机组的检修,经济费用还包括发电机组检修费用和生产费用(主要考虑燃料成本和停电损失),约束条件还包括发电机组的检修约束。在发输电检修计划中,可靠性约束,指可靠性指标(可选为停电功率期望值 EPNS水平)不能超过规定值。

以上数学模型是一个高维度、离散化、非线性、随机的整数规划问题。通过 Benders分解可以将其分解为检修主问题和运行子问题两大问题进行分散协调。Benders分解法<sup>[16]</sup>可以同时包含检修计划的

整数性、随机性、非线性等特点而且无需简化,所得结果具有相当高的可行度,且具有较高的计算效率。

文献[9]第一次提出了将 Benders分解法用于发电机组检修计划。文献[10]考虑了燃煤约束。文献[17]将 Benders分解法用于多区域的互联系统检修,并考虑了网络约束问题。文献[18]将 Benders分解法用于单区域含电网约束的发电机组检修计划。文献[13]将 Benders分解法用于发输电组合系统的发、输电设备检修,文献[14]又把燃煤约束和排污约束考虑进去,兼顾的内容更加全面。这是一类很值得继续研究的算法。文献[15]将 Benders分解法用于电力市场下的长期发输电联合检修计划。

### 1.3 灵敏度分析法

灵敏度分析法<sup>[19]</sup>以系统负荷供应能力 LSC最大作为检修目标。它的基本思想是对一个给定的检修计划,建立 LSC模型,根据二元理论,可通过 LSC模型的解得到系统负荷供应能力相对每个设备的中断连接的灵敏度,从而决定是否需要重新安排检修计划;如果是,应重新安排哪个设备的检修来改进检修计划。它的优点是原理简单,计算量小,但主要考虑的是系统的可靠性,没有体现可靠性与经济性的综合优化。而且得到的只是一个可行解,再加上建模不够精确,影响结果的最优性。

文献[19]描述了一个水电机组和输电线路联合检修的模型。检修约束为检修周期内每个机组和每条线路只能检修一次;网络约束用直流模型表示,提出的方法以灵敏度分析为基础并尽量保持输送功率在计划的限度内,包含了不同的网络表示法,例如线性或完全的潮流模型,负荷和设备故障的不确定性。

### 1.4 基于 Benders分解的输电线路检修计划优化算法

该算法<sup>[20,21]</sup>以经济性目标作为数学模型的目标函数,借助 Benders分解法在处理大系统优化问题上的诸多优点,包含了输电线路检修计划问题中复杂的网络约束。文献[21]建立了解除管制的电力系统中短期输电线路检修计划的数学模型并用 Benders分解法进行求解。经济费用中考虑了输电中断损失,从而体现了可靠性与经济性的综合平衡。文中将网络约束细分为:有功功率约束,由节点有功功率平衡方程和有功功率损失容量限制组成;无功功率约束,由节点无功功率平衡方程,无功潮流约束,电压变化幅度限制和无功损失容量限制;

线路约束,指线路有功容量限制。因此建立的模型比较精确,有利于得到可行度高的结果。

### 1.5 基于可靠性评估的输电线路检修计划优化算法

基于可靠性评估的输电线路检修计划<sup>[22,23]</sup>是介于计划检修和以可靠性为中心的检修<sup>[24]</sup>之间的一种方法。它的算法思想是在安排检修计划之前,利用可靠性评估方法评估系统在各检修时段内可能出现的不可靠风险,然后作出检修计划的安排决策,即把检修计划的最优安排嵌入到系统可靠性分析中。

文献[23]用 Monte Carlo模拟法<sup>[25]</sup>定量估计了线路计划检修对整个输电系统的运行可靠性的影响。不仅提供了风险最小的检修计划,还提供了计划检修时最可靠的运行模式。提出的输电检修过程包括以下四个步骤:应用传统的检修计划方法确定一个初步的计划;通过系统分析选择计划中断期间可能的系统运行模式;步骤中通过输电系统可靠性评估方法认定几个可接受的运行方案后,从中确定最可靠的运行模式;在通过基于时间交替的输电系统可靠性评估方法认定的计划中断的可用时间中,确定风险最小的检修安排。前两步是传统的输电检修方法,因此这种算法易于嵌入到现有的传统输电线路检修计划方法中。因为这种方法总是确保系统运行风险最小,在电力工业解除管制的新环境下,检修过程可变成输电系统阻塞管理策略的一部分。但是,对于规模较大,需要检修的线路数量大的输电系统,要从大量可行的检修计划方案中选择风险度最小的方案,计算量大,对计算速度要求较高。

文献[22]在大型交直流并联输电系统中利用 Monte Carlo模拟法和 FD相结合的混合法<sup>[26,27]</sup>评估系统的可靠性得出各个元件在不同的负荷水平下计划检修的风险,然后对系统在各检修期内的风险水平进行比较,从而做出相应的对策,保证整个系统在计划检修期间的安全性和稳定性。最优模型的目标函数是使通过可靠性评估得到的系统在全年运行中的总风险度最小,约束条件仅包括检修时段的连续性和检修时段约束,没有考虑检修资源和人员的约束。因此这种算法对经济性的优化不够。

## 2 研究方向

综上所述,目前输电线路检修计划的优化算法在建模的精确度和计算效率上不能满足实际安排检

修计划的需要<sup>[26,27]</sup>。所以,应对模型和算法本身加以充实和完善,重点从计算速度和收敛性两方面来改进现有的算法,如:基于 Benders分解的算法和基于可靠性评估的算法,或者寻求更好的新算法。在解除管制的电力系统结构下,独立系统运营商、独立电力公司和输电供应商都需要制定综合性长期计划<sup>[20]</sup>,所以应在这三个层次上研究适合各个层次的算法。

输电线路与发电设备比较,最大的特点是它处在露天野外。因此,输电线路的检修受天气的限制很大,在恶劣的天气下无法实施检修。可见,天气因素对检修的限制是必须满足的严格约束。但是天气预测存在很大的不确定性,尤其在长期输电线路检修计划中,是否可以对不同的天气提出各种备选方案,有待进一步研究。

## 3 结语

电力市场发展起来以后,输电线路检修计划不仅要考虑系统的可靠性,对检修的经济性也越来越关注。但目前普遍采用的都是传统的根据经验人工地安排检修计划,无法达到可靠性和经济性的综合优化。所以要研究输电线路检修计划的优化算法。

通过优化算法,综合平衡检修计划的可靠性和经济性,可以提高输电系统的经济效益。

输电线路检修计划优化算法的研究刚刚起步。目前占主流的四中算法都是国外提出的,这与国外电力市场化的程度有关。在所有关于输电线路检修计划的文献中只有两篇是我国发表的,而且都是2004年发表的,可见我国在这方面的研究起步比国外晚。目前我国电力市场的类型是发电市场,尚未形成输电市场,所以输电线路检修计划的优化主要针对可靠性,如文献[22]。本文介绍的四中算法各有各的优缺点,应重点从计算速度和收敛性来改进。检修计划编制部门可根据系统的实际情况来选择合适的算法。

## 参考文献:

- [1] 陈少华. 基于遗传-退火算法的发电机组检修计划的研究(硕士学位论文)[D]. 武汉:武汉大学, 2002  
CHEN Shao-hua Research on the Unit Maintenance Scheduling Based on Genetic-simulated Annealing Algorithm, Thesis[D]. Wuhan: Wuhan University, 2002
- [2] 高军,刘文颖,王秀丽,等. 发电系统检修计划优化问题实用研究[J]. 西北电力技术, 2002, (1): 22-26  
GAO Jun, LU Wen-ying, WANG Xiu-li, et al Practical

- Research on Generation Maintenance Scheduling Optimization[J]. Northwest China Electric Power, 2002, (1): 22-26
- [3] Garver L L. Adjusting Maintenance Schedules to Levelize Risk[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1972, 91 (5): 207-2063.
- [4] 周明,孙树栋. 遗传算法原理及应用 [M]. 北京:国防工业出版社, 1999.  
ZHOU Ming, SUN Shu-dong Genetic Algorithms: Theory and Applications[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999.
- [5] Yamayee Z, Sidenblad K A Computationally Efficient Optimal Maintenance Scheduling Method [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1983, 102: 330-338
- [6] Zum H H, Quintana V H. Generator Maintenance Scheduling via Successive Approximation Dynamic Programming [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1975, 94: 665-671.
- [7] Egan G T, et al An Experimental Method of Determination of Optimal Maintenance Schedules in Power Systems Using the Branch and Bound Technique[J]. IEEE Trans on Man and Cybernetics, 1976, 6: 538-547.
- [8] Chattopadhyay D, et al A Systems Approach to Least-cost Maintenance Scheduling for an Interconnected Power System [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10 (4): 2002-2007.
- [9] Yellen J, Al-Khamis T M, Vemuri S, et al A Decomposition Approach to Unit Maintenance Scheduling [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7: 726-733.
- [10] Al-khamis T M, et al Unit Maintenance Scheduling with Fuel Constraints [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7: 933-939.
- [11] 于尔铿,刘广一,周金阳. 能量管理系统 [M]. 北京:科学出版社, 2001.  
YU Er-keng, LU Guang-yi, ZHOU Jin-yang Energy Management System [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [12] 郭永基. 可靠性工程原理 [M]. 北京:清华大学出版社、施普林格出版社, 2002.  
GUO Yong-ji Principles of Reliability Engineering [M]. Beijing: Tsinghua University Press and Springer Press, 2002
- [13] Mawali M K C, Shahidehpour S M. Integrated Generation and Transmission Maintenance Scheduling with Network Constraints [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13 (3): 1063-1068
- [14] Mawali M K C, Shahidehpour S M. Long-term Transmission and Generation Maintenance Scheduling with Network Fuel and Emission Constraints [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14 (3): 1160-1165.
- [15] 丁明,冯永青. 发输电设备联合检修安排模型及算法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (5): 18-23.  
DING Ming, FENG Yong-qing Research on the Modeling and Algorithm to Global Generator and Transmission Scheduling [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (5): 18-23.
- [16] 朱道立. 大系统优化理论与应用 [M]. 上海:上海交通大学出版, 1987.  
ZHU Dao-li Optimization Theory and Applications in Large System [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1987.
- [17] Silva E L, Morozowski M, et al Transmission Constrained Maintenance Scheduling of Generating Units: a Stochastic Programming Approach [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10: 695-701.
- [18] Marwali M K C, Shahidehpour S M. A Decomposition Approach to Generation Maintenance Scheduling with Network Constraints [J]. APC Proc, 1997: 110-115.
- [19] Pinto L M V G, Filho J F P, Pereira M V F. A Model for the Maintenance Schedule of an Electrical Generation / Transmission System [A]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems 1991. 1216-1219.
- [20] Marwali M K C, Shahidehpour S M. Coordination of Short-term and Long-term Transmission Maintenance Scheduling in a Deregulated System [J]. IEEE Power Engineering Review, 1998, 18 (2): 46-48
- [21] Marwali M K C, Shahidehpour S M. Short-term Transmission Line Maintenance Scheduling in a Deregulated System [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 5 (3): 1117-1124.
- [22] 任震,黄金凤,黄雯莹. 安排交直流并联输电线路计划检修的新方法 [J]. 电力自动化设备, 2004, 24 (1): 19-22.  
REN Zhen, HUANG Jin-feng, HUANG Wen-ying Scheduled Maintenance of AC/DC Hybrid Transmission Lines [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24 (1): 19-22
- [23] LI Wen-yuan, Korczynski J. A Reliability-based Approach to Transmission Maintenance Planning and Its Application in BC Hydro System [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19 (1): 303-308
- [24] Beehler M E. Reliability Centered Maintenance for Transmission Systems [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12 (2): 1023-1028
- [25] 王国玉,肖顺平,汪连栋. 电子系统建模仿真与评估 [M]. 长沙:国防科技大学出版社, 1999.  
WANG Guo-yu, XIAO Shun-ping, WANG Lian-dong Simulation and Evaluation of Electronic System Model [M]. Changsha: National Defence Technology University

Press, 1999.

- [26] Yamayee Z Maintenance Scheduling: Description, Literature Survey, and Interface with Overall Operation Scheduling [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1982, 101 (8): 2770-2779.
- [27] Sarliwen R L. 电力系统规划 [M]. 北京:水利电力出版社, 1984.
- Sarliwen R L. Programming Power System [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1984.

收稿日期: 2004-10-28; 修回日期: 2005-04-15

作者简介:

林海华 (1982 - ),女,博士,目前的研究方向为互联网运行控制性能评价标准和输电线路检修;

E-mail: linhaihua@student.dlut.edu.cn

李卫东 (1964 - ),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为互联网运行控制及其性能评价标准、电力市场理论与应用、电力系统运行状态可视化和人工智能在电力系统中的应用。

### Summarizing the optimized algorithms to transmission line maintenance scheduling

L N Hai-hua, L I Wei-dong

(Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** Transmission line maintenance scheduling by manual work is hard to consider both the reliability and economics presently, while optimizing algorithms are able to keep their balance. The situation of the research on transmission line maintenance scheduling at home and abroad is summarized. This paper introduces two types of optimized algorithms to transmission line maintenance scheduling, which are integrated transmission line and generation maintenance scheduling optimization and single transmission line maintenance scheduling optimization. The first type mostly includes two methods that are Benders decomposition-based integrated transmission line and generation maintenance scheduling optimization and the sensitivity analysis method. The later also includes two methods which are Benders decomposition-based transmission line maintenance scheduling optimization and the evaluating reliability-based transmission line maintenance scheduling optimization. After analysing the four methods, the future research direction is presented, which should improve the computing speed and constringency of the optimized algorithms in the way of practicality.

**Key words:** transmission line; maintenance schedule; optimized algorithm; Benders decomposition; reliability

(上接第 18 页 continued from page 18)

- [8] 胡昌华,张军波,夏军,等. 基于 MATLAB 的系统分析与设计——小波分析 [M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2001.
- HU Chang-hua, ZHANG Jun-bo, XIA Jun, et al. System Analysis and Design Based on MATLAB——Wavelet Analysis [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2001.

收稿日期: 2004-10-26; 修回日期: 2004-12-02

作者简介:

李骏 (1980 - ),男,硕士研究生,从事电力系统继电保护的研究;

范春菊 (1967 - ),女,副教授,在职博士生,长期从事人工智能在继电保护及综合自动化的研究及教学工作。

E-mail: chunjuc@online.sh.cn

### Research of electrical cable travelling wave fault location based on wavelet analysis

L I Jun, FAN Chun-ju

(Dept of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** A new electrical cable travelling wave fault location based on wavelet analysis is proposed. This method injects impulse current source into electrical cable. It detects sampled signal's mode maximum point by multi-resolution analysis based on wavelet analysis. Because this point is sampled signal's discontinuity point on the cable line, fault location is realized. Compared with traditional fault location method based on ATP/Matlab simulation, this method can precisely identify reflection impulse, reduce the mistake influence of multi-branch cable transmission line and close fault reflecting wave. The result is not affected by fault types and the error of fault location can be maintained in the range of one sampling distance.

**Key words:** electrical cable; fault location; impulse current experiment; wavelet analysis