

文章编号: 1672-0792(2003)03-0001-04

基于专家系统和最优调度的输电拥塞管理研究

余志伟¹, 黄耀光¹, 孟 阳²

(1. 香港理工大学 电机工程系, 香港; 2. 上海交通大学 电气工程系, 上海 200240)

Transmission Congestion Management Based on Expert System and Optimum Dispatch

YU Zhi-wei¹, HUANG Yao-guang¹, MENG Yang²

(1. The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China; 2. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract Transmission congestion management in an open access environment is a new challenge to transmission operators nowadays. The objective of this paper is to develop a competitive market structure in transmission service to help facilitating the dispatch management and solving transmission congestion problem. Feasibility evaluation of potential contracts and optimum power dispatch of feasible contracts are two main parts of this paper. Feasibility evaluation is employed to screen out the infeasible contracts before the optimum dispatch is carried out. The feasibility evaluation uses rule-based method based on rule inference techniques. Optimal dispatch model is formulated to manage the congestion for the feasible contracts. An illustrative example on a modified IEEE 14-bus system shows that this method can achieve optimum dispatch and can efficiently solve the problem of transmission congestion.

Key words: power market; congestion management; rule-based expert system; optimum dispatch

摘要: 在开放的电力市场环境中, 输电网络的拥塞管理是电网调度人员所面临的新课题。提出一种新的调度方法, 旨在建立开放环境下的输电服务竞争机制, 帮助解决网络拥塞问题。该方法首先通过基于规则的专家系统对潜在交易进行可行性评价, 从中选出符合约束条件的作为可接受的可行交易, 然后在此基础上进行最优调度。通过改进的 IEEE 14 节点算例验证, 该方法能够实现最优调度, 能有效地解决输电拥塞问题。

关键词: 电力市场; 拥塞管理; 基于规则的专家系统; 最优调度

中图分类号: TM 71 文献标识码: A

随着电力工业放开管理 (deregulation) 的深化, 输电网络的开放正受到越来越多的关注。开放意味着电力交易的所有买方和卖方都能平等地利用网络。发电厂商根据公平竞争的原则竞价上网, 用电公司代表用户向厂商购电, 部分大的电力用户也可以直接向电厂购买低价电力。而这也正是实现放开管理的关键。然而, 由于长期以来输电系统在技术上和经济上都处于垄断地位, 因此如何运作以达到开放竞争模式还有很多问题有待解决。

开放的市场对电力调度提出了新的要求, 如何为电力交易的所有参与者提供更好的输电服务是调度人员所面临的新课题。其中, 拥塞管理问题显得尤为重要。本文集中讨论了电力交易的可行性评估和最优调度问题, 旨在建立一种开放环境下的输电服务竞争机制。

在放开管理的市场环境中, 发电、输电和配电系统分别由独立的 公司所有, 通过市场这只“看不见的手”进行调配, 以提高经济效率。在市场中, 每天都有数百笔的电力交易计划, 其中有些是可行的, 有些不能满足系统运行和交易的条件限制。对交易的可行性进行评价就是在实行调度之前对所有潜在的交易进行评估, 从中选出满足所有约束条件的作为可行交易, 参与调度。本文通过专家系统完成这一评估工作。该系统由 3 部分组成。其中, 知识库用于存储一些调度运行的具体规则和调度人员的经验知识, 事实库用于存储当前问题的有关数据和求解过程中的中间信息, 推理机则用来从知识库

中找到能够满足目标的规则集。

本文的第 2 部分根据交易的“愿支付额” (“willing-to-pay”) 优化调度。其调度原则是根据每一笔交易对调度的输电服务所愿意支付的金额对交易量进行调整。用户 (交易双方) 愿意支付的金额越高, 其实际交易量就越接近其计划交易量。因此, 对交易量的调整幅度取决于用户为避免调整而采取的报价策略以及当时系统的运行安全情况。

作为简化处理, 本文仅就文献 [1, 2] 提出的双边交易模式进行讨论。市场中存在参与交易的三方, 即发电公司 (卖方)、配电公司 (买方) 和 ISO (独立系统运行员)。买卖双方直接达成交易而无需第三方的干预。ISO 仅负责提供双方完成交易所需的输电设备, 并负责维护系统的可靠性以及降低网络损耗。

在计算中, 假设系统中母线 1 有 P_1 的注入功率作为用于补偿网损的输电服务, 该母线在潮流计算时被当作松弛节点处理, 而不参与调度管理。

本文结尾以改进的 IEEE 14 节点系统为例, 验证了本文提出的算法。结果表明, 文中提出的算法和思想适用于开放的竞争市场环境, 能够有效地解决电力市场环境下的输电网络拥塞问题。

1 交易的可行性评估

交易的可行性评估是通过基于规则的专家系统, 在优化调度之前选出所有符合系统运行和其他约束条件的可行交易。系统包括 3 部分: 知识库、事实库和推理机, 其基本结构框图如图 1 所示。知识库中包含由规则集组成的知识经验。事实库中主要存

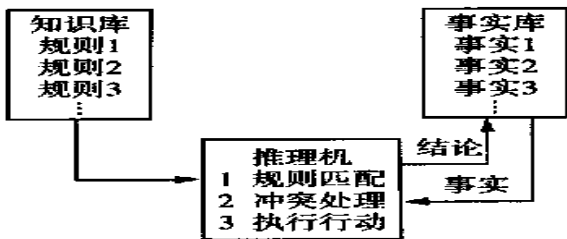


图 1 基于规则的专家系统的基本结构

Fig. 1 Basic structure of rule-based expert system

储当前问题和求解信息。推理机则针对当前问题信息, 识别和选取知识库中可用知识。推理机的原理如下: 将事实库中的事实和知识库中的规则的前提部分进行比较, 如果能够满足, 则将规则的结论部分作为新事实加入事实库。不断循环此过程, 直到

所有满足的规则都被选出为止。另外, 推理机还起到规则之间冲突检验和解决的作用。

本文用“如果 (IF) — 则 (THEN)”来表达交易和系统约束之间的规则, 这些规则用于评价交易的可行性。每一条规则由“如果”和“则”2 部分构成, 其格式如下:

事件 结果

如果 (IF) 条件满足 则 (THEN) 行动执行

可见, 该结构将“如果”部分中的事件 (也可称为前提) 和“则”中的结果 (也可称为结论) 从逻辑上有机地结合在一起。当事实库中的信息满足某一规则的“如果”部分时, 该规则的“则”部分将被执行, 同时加入事实库中。规则的“如果”和“则”部分还可通过“与” (“AND”) 和“或” (“OR”) 语句来表达多重条件和结论。

1.1 规则及其应用

用基于规则的专家系统进行可行性评价时, 存在 3 个对象集: 系统参数集、现有交易集和潜在交易集。每个对象集又包括许多子集合, 比如, 系统参数集包括一般性参数集 (含线路阻抗、母线编号等) 和限制性参数集 (含电压、线路容量限制等)。这些对象构成了输电拥塞管理专家系统知识库的主要元素。

交易可行性评价框图如图 2 所示。评价时将每一笔潜在交易与现有交易一起进行综合考虑, 如果不违反线路热稳、母线电压限制等系统运行条件限制, 则该潜在交易将与现有交易一起作为可行交易参与调度。

现假设一笔现有交易的有效时间段为 9: 00—17: 00, 交易内容为从 13 号母线到 9 号母线传送 100 MW 的功率, 则该交易可表示为:

规则 1
 如果 (IF) $9: 00 \leq t \leq 17: 00$
 则 (THEN) 传输功率 = 100 MW
 与 (AND) 注入节点 = 13
 与 (AND) 接受节点 = 9

同理, 系统运行约束也可表达为规则形式。如输电线路的热稳取决于周围的空气温度, 因此通常将线路容量分为夏季容量和冬季容量。而夏季由于周围温度较高使得线路容量相对冬季较小。

规则 2
 如果 (IF) 日期在 5 月 1 日至 8 月 31 日之间
 则 (THEN) 线路容量 = 100 MW

根据 ISO 的经验, 如果交易的“愿支付额”低于一定阈值时, 则该交易将不被接纳。

规则 3

如果 (IF) 愿支付额小于 40 \$/MW·h
则 (THEN) 该交易不被接纳

每一笔潜在交易将根据图 2 中的步骤进行校验, 校验的准则存于知识库中。有效的约束条件包括系统运行安全约束和电力交易的合同约定及其他经济方面的条件约束等。对潜在交易的初步评价主要对交易的合同约定及经济约束进行校验, 系统运行方面的约束在后续步骤进行。潮流校验则是考虑对将潜在交易包括在内的系统运行情况如线路潮流、节点电压等进行分析。只有所有运行参数在有效约束集规定的限制范围内时, 潜在交易才能被接受, 作为可行交易参与文中第 4 部分所提的最优潮流调度。

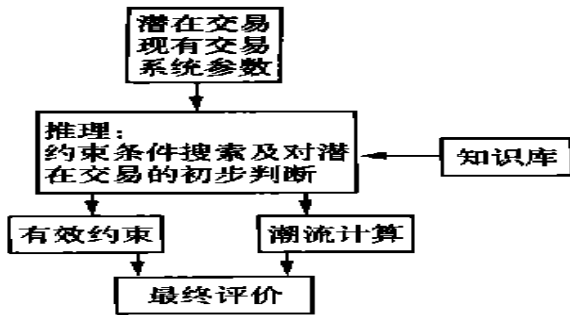


图 2 潜在交易评价框图

Fig. 2 Framework of potential contract feasibility evaluation

本文提出的专家系统是利用专家系统开发软件 CLIPS (C Language Integrated Production System) 开发的。CLIPS^[4,5] 为专家系统的开发提供了完整的规则及目标框架, 并可以利用有效的算法对知识库中的规则进行搜索。该算法称为 Rete 搜索法^[6]。开发过程中, 首先在 CLIPS 环境中建立知识库, 再将数据库中的系统参数、潜在交易等对象导入 CLIPS, 即可进行规则匹配搜索。所有匹配的规则, 其结论部分将被加入事实库中。最终的评价结果将决定该潜在交易是否被接受为可行交易, 与已有交易一起进行最优调度。

2 最优调度

所有可行的潜在交易和已有交易将根据其愿支付额进行最优调度。假设 P_{ij} 为根据交易合同, 发电

厂节点 i 对用户 j 的输出功率, D_{ji} 为根据合同用户 j 从发电厂 i 的接收功率, 则显然有:

$$P_{ij} = D_{ji} \quad i \in N_G, j \in N_D \quad (1)$$

式中: N_G 为除松弛节点外的发电机节点集; N_D 为负荷节点集。将其带入潮流计算公式, 以满足系统潮流平衡。

$$g(u, x) = 0 \quad (2)$$

式中: u 为 1 组控制变量; x 为 1 组状态变量。

u 由各交易的有功交换功率组成 ($P_{ij} > 0$, $i \in N_G$; $j \in N_D$)。母线 1 发出的功率等于所有线路传输损耗之和, 用于补偿网损对各交易造成的损失。

2.1 基于最优潮流的交易量调整

如果对于某一个交易集 u , 公式 (2) 不能满足或者违反了某些系统运行的约束条件, 则应对该交易集中各交易的交易量进行调整。调整量根据每笔交易的愿支付额 w 确定。 w 为电网用户 (交易双方) 从竞争角度出发, 为避免交易量被调整而提出的报价^[2]。 w 值越高, 则该交易的被调整量越小, 其成交量越接近计划交易量。

由线路潮流、电压界限以及发电机容量等构成的系统运行约束条件可以表达为:

$$h(u, x) \leq 0 \quad (3)$$

交易量的调整量可用优化公式 (4) 表达:

$$\min f(u, x) = \sum_{i \in N_G} \sum_{j \in N_D} [w_{ij} \times (P_{ij} - P_{ij}^0)^2] \quad (4)$$

约束条件:

$$g(u, x) = 0 \quad (5)$$

$$h(u, x) \leq 0 \quad (6)$$

式中: w_{ij} 为节点 i, j 之间交易的愿支付额; P_{ij} 为调整后的节点 i, j 之间的交易量; P_{ij}^0 为节点 i, j 之间原计划交易量。

母线 1 的发电机出力等于整个网络的有功损耗。ISO 将按照网损的大小从发电厂 1 购买这部分有功, 用于系统的调整, 其成本将分摊到其他各交易中。

3 算例

本文以改进的 IEEE 14 节点为例介绍文中提出的网络拥塞的解决方法。系统结构如图 3 所示, 共有 14 条母线, 20 条支路, 4 个发电机节点。

图 3 中, 母线 1 被选为松弛节点, 不参与交易。线路参数及网络的运行参数如表 1、表 2 所示。

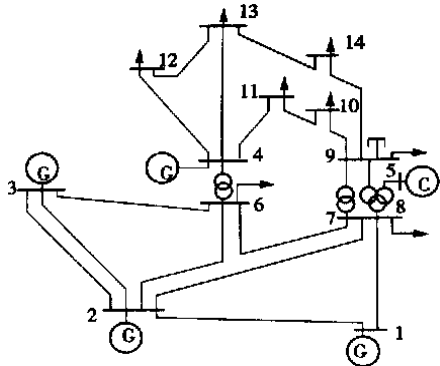


图3 改进的 IEEE 14 节点网络图

Fig. 3 Modified IEEE 14-bus system

表1 输电线路参数

Tab 1 Transmission line data

线路	R/p. u.	X/p. u.	B/p. u.	容量限制 I ² /p. u.
1-02	0.046 99	0.197 97	0.010 95	2.924 1
1-07	0.067 01	0.171 03	0.008 65	2.924 1
2-03	0.019 38	0.059 17	0.013 20	2.924 1
2-06	0.056 95	0.173 88	0.008 50	2.924 1
2-07	0.058 11	0.176 32	0.009 35	2.924 1
3-06	0.054 03	0.223 04	0.012 30	2.924 1
4-06	0.000 00	0.252 02	0.932 00	0.422 5
4-11	0.094 98	0.198 90	0.000 00	0.250 0
4-12	0.122 91	0.255 81	0.000 00	0.250 0
4-13	0.066 15	0.130 27	0.000 00	0.250 0
5-08	0.000 00	0.176 15	0.000 00	0.250 0
6-07	0.013 35	0.042 11	0.003 20	2.924 1
7-08	0.000 00	0.209 12	0.978 00	0.422 5
7-09	0.000 00	0.556 18	0.969 00	0.160 0
8-09	0.000 00	0.110 01	0.000 00	0.422 5
9-10	0.031 81	0.084 50	0.000 00	0.250 0
9-14	0.127 11	0.270 38	0.000 00	0.250 0
10-11	0.082 05	0.192 07	0.000 00	0.250 0
12-13	0.220 92	0.199 88	0.000 00	0.250 0
13-14	0.170 93	0.348 02	0.000 00	0.250 0

表2 系统运行参数

Tab 2 Base-case operating condition

母 线	U/p. u.	Q/p. u.
1	1.08	—
2	1.08	—
3	1.08	—
4	1.08	—
5	1.09	—
6	0.95~1.10	0.316
7	0.95~1.10	0.549
8	0.95~1.10	0.000
9	0.95~1.10	0.168
10	0.95~1.10	0.058
11	0.95~1.10	0.078
12	0.95~1.10	0.066
13	0.95~1.10	0.058
14	0.95~1.10	0.100

假设网络中某一时段有4笔已有交易，11笔潜在交易。各交易的计划交易量、交易类型、愿支付额如表3所示。利用CLIPS，由图2所示的流程对每一笔潜在交易进行可行性评估，其可行性结果如表3所示。11笔交易中共有4笔交易可行，它们与已有的4笔交易一起参与最优调度。调度结果如表4所示。

表3 交易信息及可行性情况

Tab. 3 Contracts data and feasibility test result

交易	计划交易量/MW	交易类型	愿支付额/ ($\$/\text{MW}\cdot\text{h}$) ⁻¹	可行性
2-07	100	已有	150	—
3-06	160	已有	140	—
4-11	40	已有	120	—
2-09	50	已有	110	—
4-12	80	潜在	105	不可行
2-13	80	潜在	95	不可行
2-10	40	潜在	90	不可行
3-11	20	潜在	88	不可行
3-10	20	潜在	85	可行
4-09	30	潜在	82	不可行
4-10	20	潜在	80	可行
3-07	30	潜在	75	可行
3-13	70	潜在	70	不可行
4-14	30	潜在	65	可行
3-12	60	潜在	40	不可行

表4 潮流调度结果

Tab 4 Transmission dispatch results

交易	原计划交易量 /MW	愿支付额 /($\$/\text{MW}\cdot\text{h}$) ⁻¹	最优交易量 /MW	调整量/%
2-07	100	150	100	0
3-06	160	140	160	0
4-11	40	120	31.4	21.5
2-09	50	110	47.6	4.8
3-10	20	85	14.9	25.2
4-10	20	80	11.5	42.5
3-07	30	75	29.5	1.7
4-14	30	65	25.1	16.3

由计算结果可知，愿支付额在交易调整量中起到了十分关键的作用。如表4中，交易4-10的调整量达到了42.5%，但如果该交易的愿支付额从80增至180 $\$/\text{MW}\cdot\text{h}$ ，则相应的调整量将降低至23.5%。

(下转22页)

由图 8 的结果可知, UPFC 采用阻尼模糊控制时, 能提高电力系统的暂态稳定, 对比 UPFC 采用线性阻尼控制时, 发电机的第 1 摆最大值有所减小, 恢复稳态所用时间短, 这说明其性能优于 UPFC 的线性阻尼控制。由于采用了修正因子法, 避免了常规模糊推理计算量大的缺点, 实时修正模糊控制输入量的最大值、最小值, 使得模糊控制器能适应不同的扰动情况。

4 结 论

本文建立了 UPFC 的动态数学模型, 给出了 UPFC 的模糊控制策略。采用修正因子法, 对仿真参数进行寻优。提出了采用阻尼模糊控制器抑制电力系统振荡的方法。运用 MATLAB 的仿真工具对含 UPFC 的双机系统进行了仿真。仿真结果表明, UPFC 能有效地抑制系统振荡, 提高电力系统的动态稳定性。同时也证明了 UPFC 采用模糊控制的有效性和控制器设计的正确性。

(上接 4 页)

4 结 语

本文以 IEEE14 节点系统为例介绍了在开放环境下的一种输电拥塞管理的新方法。该方法包括 2 部分, 首先利用专家系统对所有潜在交易进行可行性评估, 然后对所有可行交易根据其交易双方提供的愿支付额对交易量进行调整, 以达到最优调度。算例结果表明, 该方法能够适用于开放市场竞争环境下的电力市场调度, 能够较好地解决输电拥塞问题。

参考文献:

[1] DAVID A K. Dispatch methodologies for open access transmission systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13 (1).

参考文献:

[1] 付立军. 统一潮流控制器的控制及其对电力系统稳定的作用 [D]. 武汉: 武汉大学, 2002
 [2] 诸静. 模糊控制原理及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
 [3] 黄振宇. 统一潮流控制器的控制系统分析及控制策略设计 [J]. 电网技术, 1999, 23 (7): 3-8.

附 录

UPFC 的参数为

$$V_B=220 \text{ kV}, S_B=100 \text{ MVA}, n_1=n_2=0.05, X_{T1}=0.001, X_{T2}=0.0015, X_{T3}=X_{T4}=0.1, G_1, G_2: P=700 \text{ MW}, Q=500 \text{ MVAR}, x_d=1.8, x'_d=0.15, x_q=1.7, x'_q=0.3, T'_{d0}=4.1, T''_{d0}=0.03, T'_{q0}=0.04$$

作者简介: 吕小静(1980—), 女, 湖北京山人, 武汉大学硕士生, 从事电力电子及数字信号处理方面的研究; 王超(1976—), 男, 湖北荆门人, 武汉大学硕士生, 从事灵活电力系统的研究; 黎文安(1964—), 男, 湖北汉川人, 武汉大学副教授, 主要从事电力系统稳定和故障诊断的研究。

[2] FANG R S DAVID A K. Optimum dispatch transmission contracts[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(2).
 [3] DURKIN J. Expert Systems: Design and Development[M]. Macmillan Publishing Company, 1994.
 [4] GIARRATANO J RILEY G. Expert systems: principles and programming[M]. PWS Publishing Company, 1998
 [5] <http://www.ghgcorp.com/clips/download/documentation>, CLIPS Basic Programming Guide, Version 6.10, 1998-08-05.
 [6] FORGY C L. RETE: a fast algorithm for the many pattern / many object pattern match problem[J]. Artificial Intelligence, 1982, 19(1): 17-37.

作者简介: 余志伟, (1952—) 男, 获得英国曼彻斯特大学理工大学硕士学位、香港理工大学博士学位, 曾在香港中华和电力公司任保护工程师, 现为香港理工大学副教授, 从事电力市场、电价、经济和保护的的研究。黄耀光, 男, 香港理工大学副教授, 研究方向为系统控制、电力系统。

欢迎刊登广告 以我媒介 为您服务