

具有 FACTS 设备的多目标电网规划

牛辉,程浩忠,张焰,陈陈

(上海交通大学电气工程系,上海 200030)

摘要: 提出了具有灵活交流输电 (FACTS) 设备的多目标妥协规划模型,综合考虑了 FACTS 设备对电网规划的经济性和可靠性两方面的影响,并采用混合遗传—模拟退火算法求解了该模型。算例结果表明 FACTS 设备能够提高电网规划的经济性及经济性、可靠性的综合水平,并证明了多目标电网规划妥协模型及其解算方法的有效性。

关键词: 灵活交流输电; 电网规划; 可靠性; 混合遗传—模拟退火算法

中图分类号: TM715 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2000)11-0013-04

1 引言

FACTS 具有改善电压、提高电力系统的静态和动态稳定性等功能^{[1][2]},自 80 年代提出以来受到了各国电力工业界的高度重视。FACTS 设备关系到电力系统规划、运行、调度、市场等多方面的发展,具有改善输电系统性能,提高线路传输能力的作用,在国际上已被应用于电网规划之中,如:英国的电网公司管辖的输电网络由于已趋于完善,需要架设的线路有限,主要是依靠局部改造和采用 FACTS 技术提高网络的输电能力^[3]。在我国,具有 FACTS 设备的电网规划方面的研究则刚刚起步^[4],深入进行这方面的研究对我国电力系统规划的发展具有重要意义。

在 FACTS 设备中,利用可控串联补偿 (TCSC) 装置增加输电能力、提高电力系统的稳定性是一种经济的选择。东北电力公司通过在伊敏至冯屯间的 500kV 输电线上装设串联补偿装置,避免了架设通过林区的输电线路,获得了一定的经济效益^[5]。TCSC 是 FACTS 第一个正式应用的项目,它代表着常规串联补偿技术的新发展。因此,本文主要研究了具有 TCSC 的电力系统规划问题,提出了具有 FACTS 设备的多目标妥协规划模型。该模型不仅考虑了 FACTS 设备,而且在方案的寻优过程中考虑了线路投资、正常运行、N-1 情况下的过负荷及用户缺电损失等经济性和可靠性指标,从而提高了规划的经济性和可靠性水平。

2 TCSC 提高线路输送容量的作用

随着电力系统的不断发展,输电线路的长度和输送功率也相应不断地增加。这种形势下,中、低压电网常常出现由于线路阻抗和输送功率的增大使得

电网的电压质量不能满足用户要求的情况;高压远距离输电线路的输送容量则往往受到静态或动态稳定条件的限制。TCSC 是一种改善电压质量、提高送电容量的有效措施。

2.1 改善中、低压线路输送容量的作用

交流输电线路中装设 TCSC 后,由于线路功率通过 TCSC 时产生的无功功率补偿了一部分负荷及线路电抗中消耗的无功功率,使线路的电压降落减少。设 R_L 为线路的电阻; X_L 为线路的电抗; α_2 为线路末端的功角; X_C 为 TCSC 的电容,则装设 TCSC 后,线路的电压降落减少了 $(X_C/X_L)/(1 + R_L \text{ctg } \alpha_2/X_L)$ ^[6]。

中、低压线路的输送容量常常受到电压降落限制的影响。由于 TCSC 可以减少线路上的电压降落,因此能够提高线路的输送容量。当不考虑 TCSC 对负荷功率因素及线路电压的影响时,在相同的最大允许电压情况下,由最大允许电压损失 U_{zd} 决定的线路输送功率为:

$$P_{zd} = \frac{U_{zd} U_2}{R_L + (X_L - X_C) \text{tg } \alpha_2} \quad (1)$$

其中, U_2 为线路末端电压。线路的输送容量较未装设 TCSC 时提高了 $K_C/(1 - K_C + R_L/X_L \text{tg } \alpha_2)$ 倍。其中, $K_C = X_C/X_L$ 为线路的补偿度。由上式可以看出,补偿度与电压改善的程度和线路的输送容量有关。补偿度相同情况下,线路电阻与电抗的比值越大,电压和输送功率改善的效果就越差。中、低压配电网中电阻与电抗的比值较大,因此为改善电压质量和线路输送容量,应选择较大的补偿度。

2.2 串联补偿改善高压输电线路输送容量作用

对于高压输电线路,装设容抗为 X_C 的 TCSC

后,线路的输送功率为:

$$P = \frac{U_1 U_2}{X_L - X_C} \sin \delta = P_{\max} \sin \delta \quad (2)$$

其中, U_1 和 U_2 分别为线路始端和末端的电压; δ 为线路始端与末端电压的相角差; P_{\max} 为线路的极限输送功率。

由式(2)可以看出:高压输电线路的极限输送功率与线路的电抗成反比。输电线路电抗的降低将提高线路的稳定极限和输送功率。TCSC 具有补偿线路电抗的作用,因此可以提高线路的输送能力。同一个角度 情况下,装设 TCSC 可以使输电功率增加 $1/(1 - K_C)$ 倍。因此为了提高高压输电线路的输送能力,应该选用尽可能大的补偿度。但实际工程中,TCSC 补偿度的选择受到运行条件和经济性等条件的限制。从经济性角度来看,补偿度的增加,提高了极限输送容量和该条线路输电的经济性。但是,在电压不变、导线截面不增大的情况下,输送功率增加时,与其平方成正比的有功功率损耗将增大。同时,当补偿度大于某一个数值时,为了进一步提高输送容量,TCSC 容量将剧烈增加,经济投资大幅度增加。所以,从高压输电的经济性考虑,最大的串联补偿度一般在 $0.4 \sim 0.6$ 之间^[6]。

3 具有 FACTS 设备的多目标规划模型

近年多次发生的大规模停电事故^[7],使电力系统的安全性、可靠性问题受到了国际上的普遍重视。同时随着电力行业逐步走向市场化,节省供电方投资不再是电网规划的唯一目的,人们开始注重投资的效益,认识到投资的增加可以带来用户缺电损失减少等可靠性效益,电网规划的经济性和可靠性研究越来越受到重视。

目前综合考虑规划的经济性和可靠性的方法有:将可靠性指标转化成经济性指标加入目标函数,以求得两方面综合成本最低的网架方案,如:文^[8]提出的配电网规划,目标函数考虑了线路投资费用和缺电损失费用;将经济性和可靠性指标作为目标规划的目标处理,以获得各目标的折中方案,如:文^[9]将线路投资、缺电损失(EENS)和环境因素(走廊占地面积)作为规划的三个目标求解。

本文从规划的经济性和可靠性的综合水平角度出发,提出了具有 FACTS 设备的多目标妥协规划模型。

3.1 模型的数学描述

具有 FACTS 设备的多目标电网规划模型的数

学描述如下:

obj.

$$f_1 = \min \sum_{k=1}^{NP} \left\{ \frac{IC[u(k-1)] + FC[u(k-1)]}{(1+r)^{m(k-1)}} + \frac{OC[x(k)]}{(1+r)^{m(k-1)}} \right\} \quad (3-a)$$

$$f_2 = \min \sum_{k=1}^{NP} \frac{COC[x(k)]}{(1+r)^{m(k-1)}} \quad (3-b)$$

s. t.

$$x(k+1) = x(k) + u(k) \quad (3-c)$$

$$x(k) \leq X(k) \quad (3-d)$$

$$u(k) \leq U(k) \quad (3-e)$$

$$|P_{ij}(k)| \leq \bar{P}_{ij} \quad (3-f)$$

$$|P_{ji}(k)| \leq \bar{P}_{ji} \quad (3-g)$$

其中,

$$IC[u(k-1)] = \sum_{i=1}^{lk} C_i L_i \quad (4)$$

$$FC[u(k-1)] = \sum_{i=1}^{fk} C_f S_i \quad (5)$$

$$OC[x(k)] = K_D P_{\text{Loss}}[x(k)] T \quad (6)$$

$$COC = \sum_r P_r T_r \sum_{i=1}^{Ln} IEAR_i \times EENS_{i,r} \quad (7)$$

$$EENS_r = \sum_q LC_{q,r} \prod_{j \in S_{jq}} P_{qj} \prod_{k \in S_{ik}} (1 - P_{qk}) \quad (8)$$

$x(k)$ 为第 k 阶段的网络; $u(k)$ 为第 k 阶段到第 $k+1$ 阶段的网络扩展方案; $IC(u(k-1))$ 为第 k 阶段新增线路的投资费用; C_i 为线路的价格; L_i 为线路的长度; lk 为该阶段架设的线路数目; $FC(u(k-1))$ 为第 k 阶段新增 FACTS 设备的投资费用; C_f 为单位容量 FACTS 设备的价格; S_i 为 FACTS 设备的容量; fk 为该阶段装设 FACTS 设备的数量; $OC(x(k))$ 为 $x(k-1)$ 按方案 $u(k-1)$ 扩展到状态 $x(k)$ 后网络的网损费用; K_D 为电价; P_{Loss} 为线路有功功率损耗; T 为年损耗小时数; $COC(x(k))$ 为第 k 阶段的缺电损失; r 为贴现率; $m(k) = \sum_{i=1}^k y(i)$ 为规划初期到第 k 阶段末的总年数; $y(i)$ 为第 i 阶段包含的年数; Ln 为负荷节点数; S_{LD} 为系统的负荷水平集合; $IEAR_i$ 为节点 i 的缺电损失评价率^[12], 为电网供电中断引起的用户损失; $EENS_{i,r}$ 为第 r 种负荷水平下,节点 i 的电量不足期望值; S_F 为系统故障事件集合; P_r 、 T_r 为第 r 种负荷水平的概率和负荷持续时间; S_{h_q} 、 S_{H_q} 分别为发生故障 q 时故障设备集合和正常设备集合; P_{qj} 、 P_{qk} 为故障 q 状态下,设备 j 、 k 的

故障停运概率; $LC_{q,r}$ 为发生故障 q 时系统的切负荷量。

上述模型的目标函数 f_1 以经济性投资的贴现值最小为目标, 目标函数 f_2 以可靠性缺电损失的贴现值最小为目标, 同时计及了正常运行和 N-1 校验情况下线路的过负荷情况, 综合考虑了电网规划的经济性和可靠性多方面因素。

3.2 妥协模型的目标函数

采用评价函数法^[7]构造妥协模型的目标函数 $u(f)$:

$$\min u(f) = \min(w_1 \cdot f_1/f_1^* + w_2 \cdot f_2/f_2^*) \quad (9)$$

其中, $w_i \in (0, 1)$ 为对应目标函数的权系数; f_1^* 和 f_2^* 分别是目标函数 f_1 和 f_2 的最优解。通过上式, 多目标规划模型转化为妥协规划模型。该模型的最优解是各目标函数距离其最优点的综合距离最近的方案, 从而具有最佳的经济性和可靠性综合水平。

3.3 妥协模型权系数的确定

为了使权系数反映各目标函数的重要程度, 使用 - 法^[10]计算权系数, 过程如下:

设模型具有 m 个目标函数 $f_i(x) (i=1, \dots, m)$, 在可行域 X 上极小化各目标函数, 得到极小点 x^j :

$$f_j^* = f_j(x^j) = \min_x f_j(x), (j=1, \dots, m) \quad (10)$$

根据得到的极小点可计算出 m^2 个目标值:

$$f_{ij} = f_i(x^j), (i, j=1, \dots, m) \quad (11)$$

通过求解方程组

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m f_{ij} \cdot w_i = f_j^*, & (j=1, \dots, m) \\ \sum_{i=1}^m w_i = 1 \end{cases} \quad (12)$$

得到

$$(w_1 \dots w_m)^T = \frac{e^T (f_{ij})^{-1}}{e^T (f_{ij})^{-1} e} \quad (13)$$

其中, $e = (1, \dots, 1)^T$ 是 m 维向量, $(f_{ij})^{-1}$ 为 f_{ij} 的逆矩阵。

4 模型的求解

4.1 染色体编码

采用整数编码, 将每一个待架线的走廊作为一个基因, 每个基因具有三位, 分别代表该走廊线路的类型、回路数和 FACTS 设备的补偿度。

基因(对应架线走廊): (线型| 回数| 补偿度)

染色体(对应规划方案):

(基因 1| ...| 基因 i | ...| 基因 n)

4.2 线路传输容量的确定

中、低压线路的输送容量常常受到电压降落限制的影响, 线路装设 FACTS 装置后的极限容量为:

$$P_{\max} = \min \left(\frac{U_{zd} U_2}{R_L + (X_L - X_C) \operatorname{tg} \varphi_2}, P_{h\max} \right) \quad (14)$$

其中, $P_{h\max}$ 为线路的热稳定极限。

高压远距离输电线路的输送容量往往受到静态或动态稳定条件的限制。通常情况下, 静稳定极限通过规定线路两端的最大相角差 $\delta_{ij\max}$ 实现。由于 TCSC 能够提高系统的稳定性, 提高线路的稳定极限, 因此装设了 FACTS 装置的线路两端的最大相角差 $\delta_{ij\max}$ 可以得到提高。架设了 FACTS 设备的输电线路的极限容量为:

$$P_{\max} = \min \left(\frac{P_{ij\max}}{X_L - X_C}, P_{h\max} \right) \quad (15)$$

4.3 算法的评价函数

混合遗传——模拟退火算法的评价函数为:

$$F_E = u(f) + \alpha_1 \sum_{ij=1}^{L_n} (P_{ij} - \bar{P}_{ij}) + \alpha_2 \sum_{ij=1}^{L_n} (P_{ij} - \bar{P}_{ij}) \quad (16)$$

其中, α_1, α_2 分别为网架正常运行和 N-1 校验时过负荷值对应的惩罚因子。

5 算例及分析

采用 18 节点算例系统^[11]。计算可靠性指标需要的数据参考文^{[12][13]}: 线路的架设费用取 154 万元/km, FACTS 设备的价格取 28 万元/MVar, 缺电损失评价率取 0.5 元/kWh, 年损耗小时数 T 取 4000h。为了分析 FACTS 设备对电网规划经济性、可靠性以及妥协规划模型的影响, 分别将算例系统装设 FACTS 设备前后的经济性最优方案 1、可靠性最优方案 2 和妥协模型最优方案 3 列于表 1 和表 2, 综合最优方案的架线信息列于表 3, 具体网架见图 1。

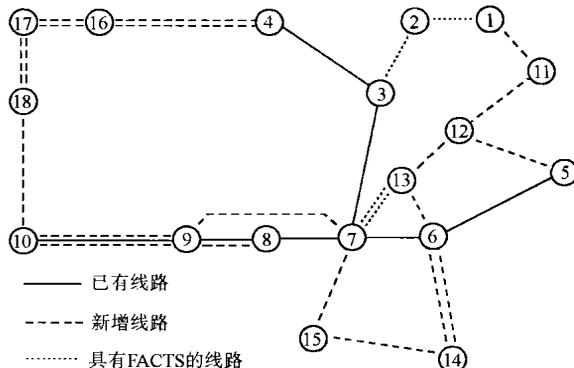


图 1 综合最优方案

表 1 不具有 FACTS 设备的规划结果

方案	总投资费用 (亿元)	新架线路长度 (km)	缺电损失 (万元)
1	40.2556	2614	979.34
2	47.0008	3052	836.304
3	44.2596	2874	869.774

表 2 具有 FACTS 设备的规划结果

方案	总投资费用 (亿元)	新架线路长度 (km)	FACTS 设备容量 (MVar)	缺电损失 (万元)
1	39.9118	2354	1307.24	1988.37
2	61.0908	3052	5032.16	817.039
3	41.7072	2544	903.456	931.772

表 3 综合最优方案的架设信息表

新架线信息	FACTS 设备信息
1-11,4-16(2),5-12,6-14(2),7-9,7-13(2),7-15, 8-9,9-10(2),10-18,11-12,12-13,14-15(2), 16-17(2),17-18(2)	1-2(0.6), 2-3(0.6), 7-13(0.2)

注:括号内数值分别表示线路的数目及补偿度

将 FACTS 设备装设前后的经济性、可靠性和妥协模型获得的最优规划方案对比发现:

从经济性角度,具有 FACTS 设备的经济性最优方案 1 架设线路 2354km,投资 39.9118 亿元,其投资少于不具有 FACTS 设备的方案。不具有 FACTS 设备的经济性最优方案架设线路 2614km,总投资为 40.2556 亿元。具有 FACTS 设备的最优方案虽然装设了 1307.24MW 的 FACTS 设备,增加了 3.6602 亿元的投资,但这部分增加的投资减少架设线路 260km,节省线路投资 4.004 亿元。因此,FACTS 设备使经济性最优规划方案节省了 3438 万元的投资,提高了规划方案的经济性。

从经济性和可靠性的综合水平角度,由表 2 可以发现:经济性最优的方案 1,其可靠性指标与可靠性最优指标 f_2^* 的偏差率为 143.36%;可靠性最优的方案 2,其经济性指标与 f_1^* 的偏差率为 53.06%;根据妥协性模型获得的具有 FACTS 设备的最优规划方案 3,其经济性指标与 f_1^* 的偏差率为 4.498%,可靠性指标与 f_2^* 的偏差率为 14.02%,相对经济性和可靠性分别最优的方案更接近由 f_1^* 和 f_2^* 组成的多目标规划的理想点,具有较好的经济性与可靠性的综合水平。另外,FACTS 设备不仅使妥协模型获得的最优方案节省了 2.5524 亿元投资,而且该方案对应的理想点的经济性和可靠性指标都优于不考虑 FACTS 设备妥协模型对应的理想点。因此,FACTS 设备提高了方案经济性与可靠性的综合

水平。

6 结语

通过对算例系统规划结果的分析可以得到如下结论:

FACTS 通过改变网络的潮流分布和减小稳定约束对线路的输电容量的限制,充分利用网络的已有输电能力,提高了规划方案的经济性。

由妥协模型获得的具有 FACTS 的最优方案,其经济性和可靠性的综合水平高于不具有 FACTS 的最优方案。采用 FACTS 技术改造、扩建原有电网不仅具有很大的经济效益,而且具有较高的经济性和可靠性的综合水平。

参考文献:

- [1] Gyugyi L, Schauder C D, Williams S L et al. The Unified power flow controller: A new approach to power transmission control. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(2): 1085 ~ 1093.
- [2] 何大愚. 柔性交流输电技术和用户电力技术的新进展. 电力系统自动化, 1999, 23(6): 8 ~ 13.
- [3] 张运洲. 英国电力工业管理和电网规划综述. 中国电力, 1997, 30(6): 55 ~ 58.
- [4] 陈礼义, 曾颖, 李林川, 宋玉秋. 具有 FACTS 设备的输电网络规划. 中国电机工程学报, 1999, 19(1): 6 ~ 9.
- [5] 翟耀希, 陈亚伦, 伊敏. 伊敏—大庆 500kV 系统串联补偿方案研究. 电网技术, 1994, 18(5): 49 ~ 54.
- [6] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [7] 王梅义, 吴竟昌, 蒙定中. 大电网系统技术. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [8] Gerd Kjolle, Lars Rolfseng, Eyolf Dahl. The economic aspect of reliability in distribution system planning. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(2): 1153 ~ 1157.
- [9] 谢敬东, 王磊, 唐国庆. 遗传算法在多目标电网优化规划中的应用. 电力系统自动化, 1998, 22(10): 20 ~ 22.
- [10] 胡毓达. 实用多目标最优化. 上海科学技术出版社, 1989.
- [11] 王锡凡. 电力系统优化规划. 水利电力出版社, 1990.
- [12] 张焰. 不确定性的长期电网规划方法研究. 上海交通大学博士论文, 1998.
- [13] 上海交通大学可控串补技术组. 可控串补技术译文集. 国家自然科学基金重点项目, 1996: 102 ~ 114.

收稿日期: 2000-05-10

作者简介: 牛辉(1971 -), 女, 博士研究生, 主要研究电力系统分析和规划方法。

上下级电网保护配合分析计算

俸 玲¹, 王广学¹, 李昌喜²

(1. 湖北省电力调度通信局, 湖北 武汉 430077; 2. 郑州市电业局, 河南 郑州 450000)

中图分类号: TM744 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2000)11-0017-03

电力系统一般采用分级调度管理, 220kV 以上电网一般由省、网局调度管辖, 110kV 及以下电网由地区调度管辖, 相应的继电保护也是分级整定管理。在这种管理模式, 上级电网与下级电网继电保护就存在相互配合的问题。实际运行中必须满足有关规程规定的逐级配合的要求。

在实际运行中, 一般采用的方法是上级电网给下级电网下达有关母线出线各类保护的限制定值, 下级电网保护定值必须满足上级电网下达的定值限制要求。下级电网与上级电网有配合要求的应进行相应的配合计算。有的地区调度可能不具备与上级电网保护配合的计算条件, 就没有考虑与上级电网的配合, 这就存在保护失配问题, 应引起重视。

本文主要讨论有关上述配合问题的计算方法, 供同行参考。

1 上级电网与下级电网保护配合计算

上级电网与下级电网保护满足配合要求所采用的办法是上级电网根据主系统电网保护定值实际情况与下级电网进行配合计算, 再给出下级电网的保护定值的范围, 下级电网必须根据上级调度下达的限制定值进行保护整定计算。具体分析分以下两种情况:

1.1 上级电网与下级电网馈线保护配合计算

如图 1 所示, 上级电网 220kV 开关 M、N 与 110kV 馈线开关 C、D 配合, 这时 M、N 等开关保护定值已经整定配合好, 由于 C、D 等开关由地区调度管

辖, M、N 等开关并未考虑与 C、D 等开关配合, 所以必须下达限制定值来满足配合要求。以下分别介绍零序和距离保护的限制定值计算。

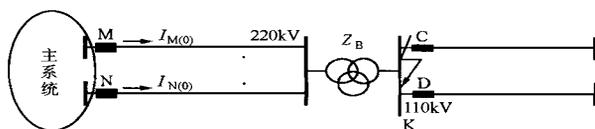


图 1 开关 M、N 与馈线开关 C、D 配合

1.1.1 零序电流限制定值计算

图 1 中, C、D 为 110kV 馈线开关, 如果 110kV 母线有其它馈线, 计算方法完全一样。上级电网计算馈线限制定值时, 不需要馈线的具体参数。图 1 中 110kV 母线 K 点的正序、零序阻抗为 $Z_{KK(1)}$ 和 $Z_{KK(0)}$, K 点单相接地短路, 故障点总零序电流为:

$$I_{k(0)} = \frac{E}{2Z_{KK(1)} + Z_{KK(0)}} \quad (1)$$

式中: E 为系统电压;

$Z_{KK(1)}$, $Z_{KK(0)}$ 分别为 K 点的正序和零序总阻抗。

$I_{k(0)}$ 为 K 点总零序电流的有名值。

这样 K 点单相接地短路时, 开关 M、N 分别与 110kV 母线上所有馈线的零序分支系数为:

$$\begin{cases} K_{FM} = \frac{I_{M(0)}}{I_{k(0)}} \\ K_{FN} = \frac{I_{N(0)}}{I_{k(0)}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $I_{M(0)}$ 、 $I_{N(0)}$ 分别为 K 点短路 M 和 N 开关

Transmission network planning with FACTS devices based on economic and reliable consideration

NIU Hui, CHENG Hao-zhong, ZHANG Yan, CHEN Chen
(Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: In this paper, a multi-objective compromise model with FACTS devices is proposed. This model takes both the economy and reliability of planning into account. A modified Hybrid Genetic/ Simulated Annealing algorithm is developed to solve this problem. The results of the example demonstrate that FACTS devices can improve the integrate level of economy and reliability and bring great economic benefits in transmission network expansion.

Keywords: FACTS; power network planning; reliable level; hybrid Genetic/ Simulated Annealing Algorithms