

# 基于 TPLAN 的中国南方电网可靠性与经济性评估

王超,徐政,高慧敏

(浙江大学电机系,浙江 杭州 310027)

**摘要:** 南方电网是我国目前唯一投入运行的超高压、远距离、交直流并列输电的大型区域电网,其可靠性与经济性分析具有重要意义。首先探讨了交直流并联系统可靠性评估的特殊性及研究进展,并对发输电系统可靠性评估软件 TPLAN 的特点、方法和功能进行了简要介绍。利用该软件对南方电网进行了可靠性与经济性评估。通过计算系统整体可靠性指标,得出南方电网停电影响的严重级别为 2 级。通过计算各省区及主要负荷点的可靠性指标,得出广东省电网的可靠性水平最低,是整个南方电网的薄弱环节。引入用户停电损失函数的概念,对南方电网进行了经济性评估,计算出全网及各省的经济性指标。此外,还研究了系统可靠性评估结果对元件可靠性参数的灵敏度问题。上述分析所得结论对于今后南方电网及全国电网的规划、运行都有较高的工程意义和参考价值。

**关键词:** 南方电网; 大规模发输电系统; 交直流系统; 可靠性; 经济性; 灵敏度分析; 解析法; TPLAN

**中图分类号:** TM711      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-4897(2006)16-0061-07

## 0 引言

我国电网已进入跨大区互联、超高压交直流混合输电时期。系统规模的不断扩大也使停电可能造成的损失越来越大。研究表明,可靠性与经济性并非两个独立的指标,二者结合应用于电力系统可以取得显著的经济效益<sup>[1,2]</sup>。南方电网作为我国目前唯一投入运行的远距离、大容量、交直流并联运行系统,对其进行可靠性与经济性分析具有重要意义。

文献[3]作为电力系统可靠性分析领域的早期著作,全面介绍了电力系统可靠性分析的基本理论,文献[4]综述了发输电系统可靠性评估软件方面的成果。经过国内外专家学者的长期努力,发输电系统可靠性评估,尤其是在充裕度评估方面已取得了很大的进展,但在大规模电力系统可靠性评估方面仍存在一定困难。

大规模发输电系统可靠性评估的主要困难在于潮流计算与切负荷计算。文献[5]在这一方面做了大量有益的探索工作,将蒙特卡罗模拟法应用于大规模电力系统可靠性评估,初步提出了一系列解决计算速度与精度之间矛盾的措施。文献[6]提出了基于序贯蒙特卡罗仿真的充裕度评估模型,采用分层模型和合并相同状态技术显著减少了计算量,从而使可靠性评估初步达到实用化水平。为进一步解

决上述困难,文献[7,8]采用嵌入 BPA 潮流软件进行交流潮流计算,采用改进的潮流灵敏度方法计算系统切负荷,解决了潮流计算受系统规模限制和潮流计算模型适应能力比较差的问题,并在南方电网充裕度评估中进行了应用,但研究当中并未涉及经济性分析。

与纯交流系统相比,交直流系统可靠性评估更为复杂,其中的关键问题是如何建立直流系统的故障状态模型。直流系统传输容量大、元件多、结构复杂、故障率高,建立的故障模型应当能够如实模拟直流系统的运行情况。这方面的研究是当前的热点,并已取得重大突破。文献[9]将可靠性研究的两种经典方法(即模拟法和解析法)结合起来,提出了一种新的方法——Monte Carlo - FD 混合法,在建立交直流网络可靠性模型时分别使用 Monte Carlo 法和 FD 法,用 FD 法以确定直流系统和主接线元件的等效模型,然后将其并入交流网络进行模拟。文献[10]根据双极直流系统的结构和特点,采用故障树分析法,将直流故障结果分为单极停运、双极停运和容量降低,然后应用频率和持续时间法计算得出直流系统的多状态模型,这种方法进一步提高了评估精度。本文所采用的 TPLAN 程序中也是基于对直流系统进行状态等效的方法,考虑了直流线路对可靠性计算的特殊性,在实际工程中的应用表明,这种方法能够保证结果的精确程度<sup>[11]</sup>。

南方电网的特点是交直流共存,本文采用 TP-

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50277034)

LAN程序,对南方电网 2005 水平年夏大方式进行了可靠性评估,并与文献 [7, 8] 所得结果进行对比。在此基础上,还对南方电网进行了经济性评估,得出了相应的经济指标。上述结果对南方电网今后的规划运行有较高的工程意义和参考价值。

## 1 TPLAN 仿真软件简介

TPLAN 是由美国 PTI (Power Technologies, NC) 公司开发的、专门用于发输电组合系统可靠性评估的商业软件。自 1979 年第一个版本推出以来,经过不断改进, TPLAN 目前已经成为国际上公认的可靠性分析方面较为权威的软件。目前的版本为 TPLAN 8.5, 它能允许的系统最大母线数为 50 000 条、发电机 10 000 台、支路 100 000 条, 适合大规模发输电组合系统的可靠性评估。

TPLAN 基于解析法开发, 所采用的具体方法为状态枚举法, TPLAN 的主要功能包括确定性故障分析、概率可靠性评估、校正策略研究、灵敏度分析, 等等。用户只要按照程序指定格式输入潮流数据及元件可靠性参数, 通过简单的操作即可进行上述分析。

TPLAN 可以直接使用 PSS/E 的潮流数据文件, 可以进行 N-1 分析或多重故障分析。它提供了一种新的潮流计算方法 NDPF (Non-Divergent Power Flow) 来解决故障分析中可能出现的潮流发散问题。TPLAN 可以在基础潮流的基础上, 增加继电保护动作和负荷变化的数据, 用来模拟连锁故障引起的系统事故。在故障计算中, 系统可能出现孤岛或切机问题, TPLAN 可以根据发电机的经济分配数据来重新分配发电机的出力。除此之外, TPLAN 还采取了一系列的技术措施, 包括故障筛选、故障分类、故障截尾、故障重数限制等, 在保证计算精度的前提下, 大大减少了计算量, 提高了计算效率。

## 2 TPLAN 采用的可靠性指标体系

发输电系统可靠性分析包括充裕度与安全性两个方面, 本文主要研究充裕度, TPLAN 进行发输电系统充裕度评估时, 所采用的指标系列<sup>[11~13]</sup>如式 (1)~(10) 所示。其中, (1)~(7) 为基本指标, 用于描述给定系统的可靠性水平, (8)~(10) 为导出指标, 用于不同规模系统之间的比较, 具有标么值意义:

### 1) 电力不足概率 LOLP

LOLP 表示失负荷的可能性的, 计算公式为:

$$LOLP = \sum_{i \in S} P_i \quad (1)$$

其中:  $S$  为有切负荷的系统状态集合;  $P_i$  为系统状态  $i$  出现的概率。

### 2) 电力不足频率 LOLF

LOLF 表示每年平均故障次数, 单位次/年, 计算公式为:

$$LOLF = \sum_{i \in S} f_i \quad (2)$$

其中:  $f_i$  表示从系统故障状态  $i$  经过一次状态转移就能够直接到达系统正常状态的所有转移频率之和。

### 3) 电力不足持续时间 LOLE

表示每年发生切负荷故障的平均时间, 单位小时/年, 计算公式为:

$$LOLE = 8760 \times LOLP \quad (3)$$

### 4) 每次切负荷持续时间 LODD

LODD 表示每次切负荷的持续时间, 单位小时/次, 计算公式为:

$$LODD = LOLE / LOLF \quad (4)$$

### 5) 电力不足期望值 EDNS

EDNS 表示平均每年缺电力的多少, 单位 MW/年, 计算公式为:

$$EDNS = \sum_{i \in S} C_i \times f_i \quad (5)$$

其中:  $C_i$  表示系统状态  $i$  下, 由于发输电设备没有充足的容量满足所有负荷需求而引起的电力不足。

### 6) 每次电力不足期望值 ADNS

ADNS 表示平均每次缺电力的多少, 单位 MW/次, 计算公式为:

$$ADNS = EDNS / LOLF \quad (6)$$

### 7) 电量不足期望值 EENS

EENS 表示平均每年缺多少度电, 单位 MWh/年, 计算公式为:

$$EENS = \sum_{i \in S} C_i \times f_i \times t_i \quad (7)$$

### 8) 系统停电指标 BPII

BPII 等于系统电力不足期望与系统最大负荷之比, 它表征系统中, 每兆瓦的负荷在一年中对应的停电兆瓦数, 单位 MW/MW·a<sup>-1</sup>, 计算公式为:

$$BPII = EDNS / L \quad (8)$$

### 9) 系统削减电量指标 BECI

BECI 等于系统电量不足期望与系统年最大负荷之比, 单位 MWh/MW·a<sup>-1</sup>, 计算公式为:

$$BECI = EENS / L \quad (9)$$

### 10) 停电影响的严重性指标 SI

$$SI = BECI \times 60 \quad (10)$$

$SI$  用来描述停电影响的严重性,用系统分来度量,一个系统分代表的停电严重程度相当于在系统峰荷时整个系统停电一分钟。文献[13]根据  $SI$  值的大小,将停电影响的严重级别分为以下 5 个等级:

0 级:可接受的不可靠状态,  $SI \leq 1$ ;

1 级:对一个或多个用户有显著影响的不可靠状态,通常认为这种影响并不严重,  $1 < SI \leq 10$ ;

2 级:对用户有严重影响的不可靠状态,通常认为处于这个级别下的系统中用户受到的影响是 0 级时所受影响的 10 - 100 倍,  $10 < SI \leq 100$ ;

3 级:对用户有很严重影响的不可靠状态,通常认为处于这个级别下的系统中用户受到的影响是 0 级时所受影响的 100 倍以上,  $100 < SI \leq 1000$ ;

4 级:对用户有极其严重影响的不可靠状态,处于这个级别下的系统可能发生崩溃后出现大面积停电,  $SI > 1000$ 。

### 3 南方电网 2005 年规划方案

本文以南方电网 2005 年的规划数据为例,对其进行可靠性与经济性评估。

2005 年前后,南方电网东西方向形成两个交直流并列输电通道,其中北通道主要担负贵州电力的送出,由 1 回  $\pm 500$  kV、3000 MW 贵广直流输电线路和 2 回 500 kV 交流线路构成,南通道主要担负云南和天生桥电力的送出,由 1 回  $\pm 500$  kV、1800 MW 天广直流线路和 3 回 500 kV 交流线路构成,北通道与南通道之间由 1 回从安顺变电站到天生桥的 500kV 交流线路相联接。南方电网西电东送的功率在送端为 9000 MW 左右,在广东受端为 7000 MW 左右。南方电网 2005 年规划方案主网架图如图 1 所示。

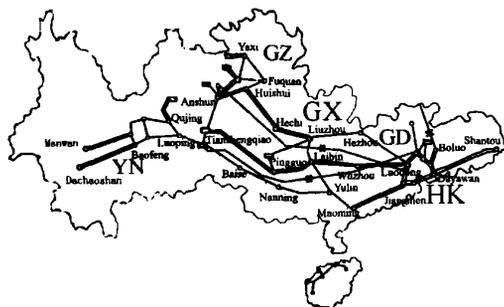


图 1 中国南方电网 2005 年规划方案主网架图

Fig. 1 Schematic diagram of China Southern Power Grid in 2005

从南方电网 2005 年规划方案数据我们可以看

出,南方电网 2005 年规划数据中含 975 条支路、714 台变压器及 148 台发电机,共计 1 837 个元件,这在 TPLAN 的计算范围之内,可以直接进行分析。2005 年南方电网与外网通过三广直流(三峡 - 广东)相联,在计算过程中为方便分析研究,将外网等效为挂在节点上的恒功率负荷,同时将南方电网按省分为 5 个区域。

## 4 可靠性及经济性分析结果

### 4.1 系统可靠性评估结果

利用 TPLAN,对南方电网 2005 年规划方案进行总体可靠性评估,分析中,对发电系统故障、输电系统故障、发输电组合系统故障均考虑 3 重,计算时间为 44.23 min,分析系统故障状态数为 74 831 个,计算环境是 P4 - 1.80 GHz 计算机,具体计算结果如表 1 所示。

表 1 南方电网 2005 年系统可靠性指标

Tab. 1 System reliability indices of China Southern Power Grid in 2005

系统总负荷/MW	47 243
LOLP	0.003 2
LOLF (occurrence/year)	1.869
LOLE (hour/year)	28.035
LOLD (hour/occurrence)	15.01
EDNS (MW/year)	1479.22
ADNS (MW/year)	791.45
EENS (MWh/year)	22 185.92
BPII (MW/MW · a <sup>-1</sup> )	0.031
BECI (MWh/MW · a <sup>-1</sup> )	0.47
SI	28.18

从表 1 可以看出:南方电网 2005 年规划方案的  $SI$  值为 28.18 系统分,所对应的停电影响的严重级别为 2 级。而文献[7,8]认为南方电网对应的停电影响的严重级别为 1 级。产生这种差别的主要原因有两个。

一是两者采用分析方法的不同,文献[7,8]采用蒙特卡罗模拟法,通过大量的模拟和统计来得到近似结果,本文则是基于解析方法,其分析模型与计算结果的精确程度要更好一些。

二是两者所采用的系统元件可靠性参数之间存在差别,文献[7,8]采用全国电网 1997 ~ 2001 年的平均可靠性统计数据,而本文所采用的元件可靠性数据则参照了我国电力可靠性管理中心公布的

2004年电网元件可靠性数据<sup>[14]</sup>及文献[12]中的部分数据。

从 TPLAN 的计算时间来看,与其它可靠性评估软件相比,TPLAN 在保持计算速度和精度上虽然具有一定的优势<sup>[11]</sup>,但以它目前的计算速度,尚无法满足系统在线评估的要求,而更适合于中长期系统规划,这也是国内外主要软件目前所共有的问题<sup>[4]</sup>。通过改进算法,在保证计算精度的前提下进一步提高计算速度,以满足在线评估的要求,是今后可靠性研究的重要方向。

此外,南方电网的系统严重程度属于2级并不意味着一定要从整体上提高电网的可靠性水平。我国主要电源与主要负荷之间距离较远,在这种情况下,

如果仍要求整个系统维持很高的可靠性水平,必然要大量增加发、输电设备投资,这有可能很不经济。因此,在系统实际运行当中,必须考虑可靠性与经济性之间的协调,如果某个地区有很高的可靠性要求,可以有针对性地提高局部地区的可靠性水平,而没有必要从整体上提高全系统的可靠性水平。

#### 4.2 区域及负荷点可靠性评估

为更有针对性地对南方电网进行分析,找出可靠性薄弱环节,按 SI 排序列出了5个省的部分可靠性指标,如表2所示。同时,列出了按照电量不足期望值排序的前10个负荷点的可靠性指标,如表3所示。

表2 南方电网2005年各省的可靠性指标

Tab. 2 Area reliability indices of China Southern Power Grid in 2005

省份	负荷/MW	EDNS (MWh/year)	EENS (MWh/year)	BPII (MW/MW·a <sup>-1</sup> )	BECI (MWh/MW·a <sup>-1</sup> )	SI
广东	24 459	792.92	11 892.57	0.016 8	0.252	15.10
广西	7 152	219.98	3 299.37	0.004 7	0.070	4.19
贵州	8 242	200.54	3 007.83	0.004 2	0.064	3.82
云南	4 545	140.36	2 105.20	0.003 0	0.040	2.67
香港	5 666	125.41	1 880.95	0.002 7	0.045	2.39
总计	47 243	7 914.5	129 330.5	0.031	0.47	28.18

表3 南方电网2005年部分负荷点的可靠性指标

Tab. 3 Bus reliability indices of China Southern Power Grid in 2005

负荷点	所属省份	负荷/MW	LOLP	EENS (MWh/year)
LIZHIJAO	香港	1 286	0.000 32	154.63
YUNLU2	广东	112	0.000 32	142.95
HETIAN2	广东	335	0.000 26	114.93
TSQDAWAN	广西	1 800	0.000 28	96.25
CIYUNSAN	香港	1 100	0.000 24	95.40
TANGBU	广西	99	0.000 27	93.45
GUINV	贵州	398	0.000 29	93.13
LIAOBU	广东	251	0.000 25	91.10
YUANMOU	云南	68	0.000 27	88.64
XIXIANG2	广东	324	0.000 28	88.11

从表2可以看出,如果以SI为衡量标准来对各省可靠性进行比较,广东省的可靠性最差,原因不难理解:一方面,广东省经济发达,电量需求很大,而其本身发电容量不足,很大程度上依靠外部输送电力,因此广东省电网本身的故障或送电线路通道故障都会影响广东省可靠性水平。因此,在今后的电网规划发展中,为保持整个南方电网的可靠性水平一致,有必要对广东电网建设增加投资,通过改善网架结构,增加机组事故备用容量等措施来提高其可靠性水平。

#### 4.3 经济评估结果

TPLAN除进行上述可靠性评估之外,还能进行经济性分析,计算系统或用户因为停电所受的经济损失。我们引入文献[15]中所提出的用户停电损失函数(Composite Customer Damage Function)概念,对南方电网进行经济性评估,分析结果可以作为今后系统规划的一个重要参考。

某地区的用户停电损失函数曲线用来表征该地区用户因停电带来的损失情况,它具有单增趋势,通常用多段折线来描述(最多6个点),如图2所示:

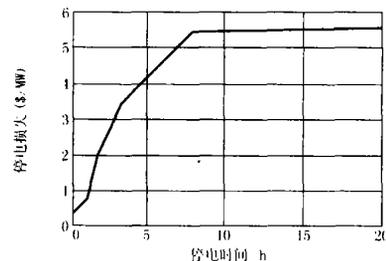


图2 某地区的用户停电损失函数曲线

Fig. 2 Customer damage cost function curve for load curtailment

文献[12]中给出了我国各省1998~2001年4年的产电比统计,可以作为各省用户停电损失函数

的参考值。对南方电网进行经济性评估,所得经济性指标如表4所示。

表4 南方电网2005年经济性评估结果

Tab.4 Economics indices of China Southern Power Grid in 2005

省份	EENS (MWh/year)	停电损失值 (x10 <sup>4</sup> \$)
广东	11 892.57	1.161
香港	1 880.95	0.343
广西	3 299.37	0.298
云南	2 105.20	0.172
贵州	3 007.83	0.141
总计	129 330.5	2.114

从表4可以看出,广东省的停电损失值最大,这也从经济方面证明,广东省是整个南方电网中比较薄弱的环节,与上一节中的结论一致。

#### 4.4 灵敏度分析

在可靠性评估中,一旦所采用的评估方法确定,元件的可靠性参数将对系统可靠性评估的结果造成

很大影响。因此,本文研究了系统可靠性评估结果对元件可靠性参数的灵敏度问题。通过改变系统元件的故障概率,得到了六种不同情况:

情况1:系统所有元件的故障概率同时减小10%;情况2:系统所有元件的故障概率同时减小5%;情况3:系统所有元件的故障概率同时减小1%;情况4:系统所有元件的故障概率同时增大1%;情况5:系统所有元件的故障概率同时增大5%;情况6:系统所有元件的故障概率同时增大10%。

表5汇总了6种不同情况下系统可靠性与经济性分析的结果。将表1所得结果作为基准数据,并将上述六种情况所得结果与此进行对比,比较结果如表5所示(括号内的百分数代表评估结果对基准数据的变化幅度,正号表示结果变大,负号则表示结果减小)。

表5 南方电网2005年可靠性评估的灵敏度分析结果

Tab.5 Reliability assessment of China Southern Power Grid based on sensitivity analysis

	LOLP	LOLF (次/年)	ELC (MW/年)	EENS (MWh/年)	S1	停电损失值 (x10 <sup>4</sup> \$)
基准结果	0.00320	1.8690	1479.22	22185.92	28.18	2.114
情况1	0.00259 (-19.06%)	1.5139 (-18.99%)	1198.22 (-19.00%)	17971.36 (-19.00%)	22.82 (-19.02%)	1.713 (-18.97%)
情况2	0.00288 (-9.92%)	1.6821 (-10.00%)	1335.76 (-9.70%)	20012.23 (-9.80%)	25.41 (-9.83%)	1.907 (-9.79%)
情况3	0.00314 (-1.98%)	1.8329 (-1.93%)	1449.64 (-1.99%)	21742.20 (-1.99%)	27.62 (-1.99%)	2.072 (-1.97%)
情况4	0.00327 (+2.08%)	1.9073 (+2.05%)	1509.25 (+2.03%)	22634.08 (+2.02%)	28.78 (+2.06%)	2.157 (+2.03%)
情况5	0.00353 (+10.31%)	2.0606 (+10.25%)	1631.62 (+10.30%)	24471.56 (+10.30%)	31.08 (+10.32%)	2.332 (+10.31%)
情况6	0.00388 (+21.25%)	2.2615 (+21.00%)	1792.83 (+21.20%)	26845.17 (+21.01%)	34.09 (+21.00%)	2.558 (+21.00%)

从表5结果可以看出,元件的可靠性参数会对系统可靠性分析结果造成很大影响:当系统所有元件的故障概率同时增大(或减小)1%时,可靠性评估结果将相应地增大(或减小)2%;当所有元件的故障概率同时变化5%时,系统评估结果将对对应变化10%;而当所有元件的可靠性参数同时变化10%时,系统评估结果的变化幅度将达到20%。这也就提醒我们,在实际工程应用当中,为了保证系统可靠性评估结果的准确性,必须充分重视系统元件可靠性参数的采集工作。

## 5 结论

本文利用大规模发输电系统可靠性评估软件TPLAN,对中国南方电网2005年规划方案进行了可

靠性与经济性评估。通过计算系统可靠性指标,对其进行了整体评价,计算结果表明南方电网停电影响的严重级别为2级。通过计算各省区及主要负荷点的可靠性指标,可以得出广东省电网的可靠性水平最低,是整个南方电网的薄弱环节,因此有必要采取措施提高广东省网的可靠性。引入用户停电损失函数的概念,对南方电网进行了经济性评估,计算出全网及各省的经济性指标。此外本文还研究了系统可靠性评估结果对元件可靠性参数的灵敏度问题,研究结果表明,元件可靠性参数将对系统可靠性评估的结果产生很大影响,因此在实际工程应用中必须十分重视元件可靠性参数的采集工作。上述结论对于今后南方电网及全国电网的规划、运行都有较高的工程意义和参考价值。

## 附录

以下列出了中国电力可靠性管理中心公布的2004年我国电力系统部分元件设备的可靠性参数,以供参考。

表 A 发电机可靠性参数(以火电机组为例)

Tab. A Reliability data of generator unit (thermal unit)

机组容量/MW	停运概率	停运时间/h
< 100	0.091	66.58
100	0.084	85.93
200	0.057	44.67
210 ~ 250	0.003	8.76
300	0.085	82.49
350 ~ 360	0.088	40.29
500	0.090	40.08
600	0.089	96.36
660	0.057	51.68
700	0.078	94.61
800 ~ 1000	0.1625	30.66

表 B 输电线路可靠性参数

Tab. B Reliability data of transmission line

线路电压等级 (kV)	故障率 (次/百公里·年)	平均故障时间 (小时/次)
110	0.2273	4.542
220	0.1936	2.708
330	0.0948	1.648
500	0.1288	3.534

表 C 变压器可靠性参数

Tab. C Reliability data of transformer

电压等级 (kV)	故障频率 (次/年)	故障持续时间 (小时)
110	0.01 ~ 0.02	450
220	0.02 ~ 0.04	700
330	0.04 ~ 0.06	2200
500	0.06 ~ 0.08	2600

## 参考文献:

- [1] 王锡凡,王秀丽,别朝红. 电力市场条件下电力系统的可靠性问题 [J]. 电力系统自动化, 2000, 25(1): 19-22  
WANG Xi-fan, WANG Xiu-li, BIE Chao-hong. Power System Reliability Issues in Power Market Environment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 25(1): 19-22
- [2] 张保会,王立永,谭伦农,等. 计及风险的市场环境下电力系统安全可靠研究 [J]. 电网技术, 2005, 29(3): 44-49  
ZHANG Bao-hui, WANG Li-yong, TAN Lun-nong. Research of Power System Security and Reliability Considering Risk Under Environment of Electricity Market [J]. Power System Technology, 2005, 29(3): 44-49
- [3] Billinton R, Allan R N. Reliability Assessment of Electric Power Systems (Second Edition) [M]. New York: Plenum Press, 1996
- [4] 丁明. 发输电系统可靠性分析软件综述 [J]. 电网技术, 2002, 26(1): 53-56  
DING Ming. A Survey of Composite Generation and Transmission Reliability Analysis Software Package [J]. Power System Technology, 2002, 26(1): 53-56
- [5] 程林,郭永基. 发输电系统充裕度和安全性算法研究 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(19): 23-26  
CHENG Lin, GUO Yong-ji. New Algorithm of Adequacy and Security Evaluation for Bulk Power System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(19): 23-26
- [6] 宋云亭,郭永基,程林. 大规模发输电系统充裕度评估的蒙特卡罗仿真 [J]. 电网技术, 2003, 27(8): 24-28  
SONG Yun-ting, GUO Yong-ji, CHENG Lin. Monte-Carlo Simulation to Adequacy Evaluation for Large-scale Power Generation and Transmission System [J]. Power System Technology, 2003, 27(8): 24-28
- [7] 程林,孙元章,郑望其,等. 超大规模发输电系统可靠性充裕度评估及其应用 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(11): 75-78  
CHENG Lin, SUN Yuan-zhang, ZHENG Wang-qi, et al. Large-scale Composite Generation and Transmission System Adequacy Evaluation and Its Application [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11): 75-78
- [8] 郑望其,程林,孙元章. 2005年南方电网可靠性充裕度评估 [J]. 电网技术, 2004, 28(19): 5-8  
ZHENG Wang-qi, CHENG Lin, SUN Yuan-zhang. Adequacy Evaluation for South China Electric Power Grid in 2005 [J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 5-8
- [9] 任震,何建军,谌军. 交直流网络系统可靠性评估的Monte Carlo-FD混合法 [J]. 电网技术, 2000, 24(5): 13-19  
REN Zhen, HE Jian-jun, CHEN Jun. Monte Carlo Comprehensive Method for Reliability Evaluation of AC/DC Hybrid Network Systems [J]. Power System Technology, 2000, 24(5): 13-19
- [10] 刘海涛,程林,孙元章. 交直流系统可靠性评估 [J]. 电网技术, 2004, 28(23): 27-31  
LIU Hai-tao, CHENG Lin, SUN Yuan-zhang. Reliability Evaluation of Hybrid AC/DC Power Systems [J]. Power System Technology, 2004, 28(23): 27-31
- [11] Power Technologies, NC [Z]. TPLAN Users' Guide, Volume I Introduction 2003.
- [12] 郭永基. 电力系统可靠性分析 [M]. 北京:清华大学

出版社, 2003

GUO Yong-ji Power System Reliability Analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003

[13] Weber E, Adler B, Allan R, et al Reporting Bulk Power System Delivery Point Reliability [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11: 1262-1268

[14] 中国电力企业联合会电力可靠性管理中心, 2004年度中国电力可靠性指标 [EB/OL]. Available: <http://www.chinaer.org/fabuhui/ind2004.asp>

The China Electric Reliability Center The China Power System Reliability Index in 2004 [EB/OL]. Available: <http://www.chinaer.org/fabuhui/ind2004.asp>

[15] Chowdhury A A, Koval D O. Application of Customer Interruption Costs in Transmission Network Reliability Plan-

ning [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2001, 37: 1590-1596

收稿日期: 2006-02-14; 修回日期: 2006-03-16

作者简介:

王超 (1981 - ), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统可靠性分析及电力系统规划; E-mail: wangchao@zju.edu.cn

徐政 (1962 - ), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为直流输电与柔性交流输电、电力谐波与电能质量、电力市场及其技术支持系统等;

高慧敏 (1978 - ), 女, 博士研究生, 研究方向为电力系统建模、分析与控制。

## Reliability and economic evaluation of China Southern Power Grid based on TPLAN

WANG Chao, XU Zheng, GAO Huimin

(Department of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** China Southern Power Grid is now the only long-distance and huge capacity power system with AC and DC transmission lines in parallel in China. Its reliability and economic evaluation is of great engineering value. This paper discusses the particularity of hybrid AC/DC power system and introduces the reliability evaluation software package TPLAN respectively. By calculating the system reliability indices, this paper gets an overview of the reliability of China Southern Power Grid, and draws the conclusion that its severity grade is Grade 2. By calculating the area and load bus reliability indices, the conclusion is drawn that Guangdong Province is the most unsubstantial part of China Southern Power Grid. In order to improve the reliability of China Southern Power Grid, it should pay special attention to improve the reliability of Guangdong province first. The conclusion is confirmed by the economic evaluation of China Southern Power Grid based on the concept of CCDF. Once the algorithm is selected, the statistic data will affect the results greatly. The sensitivity of evaluation results to statistic data is studied. All these conclusions are very valuable for later operation and planning of power system in China.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50277034).

**Key words:** China Southern Power Grid; composite generation and transmission system; AC/DC system; reliability; economic evaluation; sensitivity analysis; analytical method; TPLAN

(上接第 31 页 continued from page 31)

## Analysis and inspiration on blackout of Moscow

LU Shun<sup>1</sup>, GAO Li-qun<sup>1</sup>, WANG Ke<sup>1</sup>, LU Jia<sup>1</sup>, Zhenyu Fan<sup>2</sup>, GUO Chun-yu<sup>2</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, Northeast University, Shenyang 110004 China;

2. KEMA T&D Consulting Raleigh, NC, USA 27607;

3. Liaoning Electric Power Dispatching and Communication Bureau, Shenyang 110006, China)

**Abstract:** The problems existed in the dispatcher's treatment of arranging the mode of operation and limit the load etc, the process of taking place, development of Moscow blackout are described. This paper points out that power transmission at the margin, stable control equipment imperfection, dispatcher training unenough, transmission network construction lag, etc are the deep level reasons of the blackout. For learning the lessons from the blackout, engineers must do well for the power grid hardware construct such as enhancing three-defense line, enhancing reactive power source construction and regulation, enhancing transmission network construction etc, and software construction such as persevere unified land control and graded management, enhancing monitoring of equipment operation, enhancing dispatcher training, etc.

**Key words:** blackout; power system dispatching; security and stability