

# 含 VSC-HVDC 的交直流混合 发输电系统可靠性评估

丁明, 李小燕, 毕锐, 王京景

(合肥工业大学 电气工程学院, 安徽省 合肥市 230009)

## Reliability Assessment of Hybrid AC/DC Power System Containing VSC-HVDC

DING Ming, LI Xiao-yan, BI Rui, WANG Jing-jing

(School of Electrical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui Province, China)

**ABSTRACT:** A reliability analysis model for hybrid AC/DC power system containing voltage source converter based high voltage direct current (VSC-HVDC) is built. In the proposed model, both steady state power characteristic of VSC-HVDC and failure rate and capability constrains of transmission network are considered, and the algorithm for this model is implemented by nonsequential Monte Carlo simulation. Under the precondition of satisfying the constraints of system security, the simulation dispatching of the hybrid AC/DC power system containing VSC-HVDC is carried out, and the impact of VSC-HVDC connected with power system on power network reliability is emphatically assessed; the risk indices of power system and nodes are given to offer reference basis for the planning and operation of VSC-HVDC. The feasibility and reasonableness of the proposed algorithm are proved by case study.

**KEY WORDS:** voltage source converter based high voltage direct current (VSC-HVDC); hybrid AC/DC power system; reliability; Monte Carlo simulation

**摘要:** 建立了含柔性直流输电(voltage source converter based high voltage direct current, VSC-HVDC)的交直流混合发输电系统的可靠性分析模型, 该模型既考虑了 VSC-HVDC 的稳态功率特性, 还计及了发输电网络的故障率和输电线路的有功限制, 采用非序惯蒙特卡罗仿真实现; 在满足系统安全约束的前提下, 对系统进行模拟调度, 重点评价了与发输电网络连接 VSC-HVDC 对电网可靠性的影响, 给出系统和节点的风险指标, 为 VSC-HVDC 规划和运行提供参考依据, 最后算例分析证明了该算法的可行性和合理性。

**关键词:** 柔性直流输电系统; 混合发输电系统; 可靠性; 蒙特卡罗仿真

基金项目: 国家电网公司科技资助项目(SGKJ[2007]106)。

## 0 引言

随着电力电子技术的发展, 以电压源换流器(voltage source converter, VSC)和全控型开关器件为基础的柔性直流输电(VSC-HVDC)已得以实现。该输电技术将高压直流输电的经济容量扩展到了数百兆瓦。此外, VSC-HVDC 还具有直接向小型孤立的远距离负荷供电, 更经济地向负荷中心送电, 方便地连接分散电源, 运行控制方式灵活多变等优点。因此 VSC-HVDC 的研究成为近年来研究的热点<sup>[1-5]</sup>, 但是对其与电网互联后对电网可靠性的影响的研究甚少。

VSC-HVDC 系统传输容量大, 元件多、故障率高, 对电力系统可靠性影响较大。随着大量 VSC-HVDC 工程的投运, 迫切需要研究 VSC-HVDC 对电力系统可靠性的影响。由于交流发输电系统和传统直流输电系统的可靠性评估的研究相对成熟<sup>[6-9]</sup>, 因此对含 VSC-HVDC 系统的可靠性评估关键是对柔性直流系统元件建模, 并嵌入发输电系统可靠性评估软件, 建立交直流系统的统一模型, 完成整个系统的评估。

本文首先分析了基于 VSC 的直流输电系统的稳态模型和可靠性计算等效模型, 依据该模型建立了含 VSC-HVDC 的交直流混合发输电系统的可靠性评估模型。该模型充分考虑了 VSC-HVDC 的稳态特性和调节特性, 采用非序惯蒙特卡罗仿真对整个的元件故障进行模拟, 通过风险指标的计算, 分析了两端与有源网络连接的 VSC-HVDC 对交流电网可靠性的影响。

## 1 VSC-HVDC 的稳态特性

### 1.1 VSC-HVDC 运行原理

典型三相 2 电平的 VSC-HVDC 结构如图 1 所示, 送端和受端均采用 VSC。VSC 采用 2 电平 6 脉动型, 由换流电抗器、换流桥、直流电容器和交流滤波器组成。换流器的每个桥臂由多个绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)串联而成。换流电抗器连接交流侧和换流器, 同时起到滤除交流侧谐波的作用。直流电容器为逆变提供电压支撑、缓冲桥臂关断时的冲击电流、减小直流侧谐波。

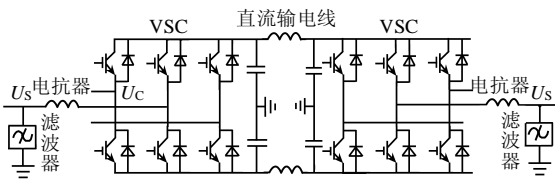


图 1 柔性直流输电原理图

Fig. 1 Principle diagram of VSC-HVDC

### 1.2 VSC 稳态功率

假设换流电抗器是无损耗的, 忽略谐波分量时, 换流器和交流电网之间的有功功率和无功功率分别为<sup>[10-11]</sup>

$$P = \frac{U_s U_c}{X_1} \sin d \quad (1)$$

$$Q = \frac{U_s (U_s - U_c \cos d)}{X_1} + \frac{U_s^2}{X_c} \quad (2)$$

式中:  $U_s$  为交流母线电压基波分量有效值;  $U_c$  为逆变桥输出电压基波分量的有效值;  $u_c$  滞后于  $u_s$  的角度为  $d$ ;  $X_c$  和  $X_1$  分别为换流电抗器和交流滤波器的基波电抗。

由式(1)和(2)可见, 有功功率的传输主要取决于  $d$ , 无功功率的传输主要取决于  $U_c$ , 改变  $d$  和  $U_c$  就可以控制有功功率和无功功率的大小和方向。因此 VSC 能够运行于 PQ 平面上的任意象限。

### 1.3 VSC 控制方式

在基于 VSC 的直流输电系统中, 其换流站主要有 3 种: ①定直流电压控制, 这种控制方式控制直流母线电压和输送到交流侧的无功功率; ②定直流电流(或功率)控制, 这种控制方式控制直流电流(或功率)和输送到交流侧的无功功率; ③定交流电压控制, 这种控制方式只控制交流母线电压。其中方式①、②适用于与有源网络相联的情况, 方式③适用于给无源网络供电的情况。本文研究两端均为有源交流网络的情况。

在正常运行方式中, 进入直流电网的有功潮流必须保持平衡, 即送端电网的有功减去系统的损耗必须等于受端接收的有功, 任何差异都将造成系统的直流电压迅速上升或降低。为实现这种平衡, 由其中的一个换流站采用定直流电压控制, 另一端采用定直流电流控制还是定交流电压控制则取决于所联的是有源交流网络还是无源交流网络。

## 2 混合系统的可靠性模型

### 2.1 VSC-HVDC 系统的可靠性模型

柔性直流输电系统及其组成元件是可修复的, 且每个元件的状态为有限种, 每个元件的寿命及维修时间都服从指数分布。因此从可靠性的角度, 可将整个系统视为在空间上具有若干个离散且可识别的状态, 而在时间上又是连续的系统。因此可用平稳的马尔可夫过程来描述<sup>[12]</sup>。

首先将整个柔性直流输电系统根据功能分成若干子系统(桥、控制、变压器、交流滤波器、直流线路、换流电抗器、直流电容器), 分别对每个子系统的内部元件的组成和特性进行研究, 并考虑元件的备用情况和相互之间的联系, 列写状态空间图, 最后按照累积状态的概念进行状态合并, 得到各个子系统的两状态的等效模型。然后将各个子系统按照其关系进行组合, 得到表征整个 VSC-HVDC 运行状态及其转移关系的等效模型, 进一步合并为两状态的等效模型。

图 2 为采用 2 电平结构无备用情况下的一侧换流桥的状态空间图, 至于 3 电平结构, 由于结构不同, 状态空间图有所不同, 但建立方法相同。图中的换流桥由 6 个 IGBT 阀臂组成, 桥正常工作的条件是 6 个阀臂都处于正常状态。状态空间图中: 1b 表示换流桥处在正常工作状态; 0b 表示换流桥处在停运状态;  $ns$  表示有  $n$  个阀处在备用状态; 数字 1、2 等表示换流桥处于不同的状态; 0.0 和 1.0 分别表示系统容量的 0% 和 100%;  $l$ 、 $m$ 、 $g$  分别为换流器中各阀臂的故障率、修复率和安装率。

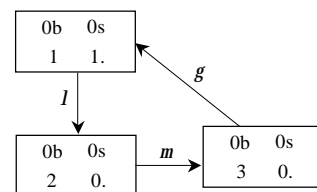


图 2 无备用一侧换流桥 3 状态等效模型

Fig. 2 Three states equivalent model of the converting bridge without spare

根据状态空间图 2 可以建立无备用情况下，一侧换流桥随机转移概率矩阵  $A$  为

$$A = \begin{bmatrix} -6l & 6l & 0 \\ 0 & -m & m \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据式(4)可求各平稳状态概率  $p_1, p_2, p_3$ 。

$$\begin{cases} (p_1, p_2, p_3)A = 0 \\ \sum_{i=1}^3 p_i = 1 \end{cases} \quad (4)$$

进而将状态 2、3 合并，得到如图 3 所示的一侧桥等效模型，其中  $l_{eq}$ 、 $m_{eq}$  分别表示换流桥等效故障率和修复率，它们分别为

$$l_{eq} = (f_{1,2}) / p_1 = p_1 \cdot 6l / p_1 = 6l$$

$$m_{eq} = (f_{2,1}) / p_2 = p_3 \cdot g / (p_1 + p_3) = 6l$$

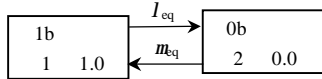


图 3 一侧换流桥的 2 状态等效模型  
Fig. 3 Two states equivalent model of the converting bridge under 1 spare

按该方法可对每个子系统建立等效模型，最后得到整个系统的状态空间图，进行状态合并后即可得到柔性直流输电系统两状态等效模型。与图 3 相似，只是其中的  $l_{eq}$ 、 $m_{eq}$  此时表示系统等效故障率和修复率。

### 2.2 混合系统可靠性模型

在以上等效模型的基础上，按照实际交直流网络的接线情况，VSC-HVDC 系统采用一等效元件代替连接于网络节点上。系统中的其他设备，如发电机、变压器、输电线路等元件均采用 2 状态模型，即正常运行状态和故障状态。一般情况下，认为正常运行时间和修复时间均服从指数分布。这样便得到了整个交直流网络的可靠性等效模型，此后的可靠性评估就在该模型上进行。这种模型既充分分析了柔性直流系统的各种状态及相互关系，又避免了直流系统内部元件众多而造成模拟效率低的问题。

## 3 可靠性评估的算法基础

### 3.1 电力系统元件故障的模拟

混合发输电系统的元件包括发电机、变压器、交流输电线路以及等效柔性直流输电系统。所有元件正常运行时间和修复时间服从指数分布，故障率  $l$ (次/a)和修复率  $m$ (次/a)是常数，且满足以下关系式<sup>[13]</sup>

$$l = 8760 / T_{MTTF} \quad (5)$$

$$m = 8760 / T_{MTTR} \quad (6)$$

$$U_{FOR} = \frac{l}{l+m} = \frac{T_{MTTR}}{T_{MTTR} + T_{MTTF}} \quad (7)$$

式中： $T_{MTTF}$  为平均无故障运行时间，h/次； $T_{MTTR}$  为平均修复时间，h/次； $U_{FOR}$  为强迫停运率。

基于非序惯仿真的蒙特卡罗抽样中，抽取服从  $[0,1]$  间均匀分布随机数  $R$  根据  $U_{FOR}$  与  $R$  之间的关系可以判断设备是否故障停运。若  $R \leq U_{FOR}$ ，设备故障；若  $R > U_{FOR}$ ，设备运行。

### 3.2 网络拓扑分析

采用前述的方法对系统中的每个元件进行抽样，如果设备发生故障，电网结构发生变化，需要进行网络拓扑分析，确定网络的分块数(孤岛数)以及每个连通块内的发电机、负荷和线路的连接情况。

本文采用顶点融合法。即以母线为节点，线路和变压器为边进行搜索，当 2 个顶点间有一条边时，2 个顶点合并，从而确定电网中孤岛数。最后对各个孤岛的电气数据进行重构，以下的状态分析和可靠性指标计算都是按岛进行的。

### 3.3 潮流计算和发电再调度措施

在可靠性评估中，每模拟到一个状态，都要对系统进行状态分析，包括潮流计算和一些优化程序，以确定系统元件过负荷情况以及必要的负荷削减量及削负荷地点。

高压交直流网络系统结构紧密，维持运行稳定性和电压水平的能力强，采用直流潮流来模拟交直流网络系统。直流潮流算法直接求解线性方程组，不需要迭代，潮流收敛性高，适用于快速的可靠性分析和经济安全调度。

对于与直流线路直接相联的节点，节点注入功率方程为

$$P_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i, j \neq dc}}^{N_B} P_{ij} + P_{dc} \quad (8)$$

式中  $P_{dc}$  表示从交流节点流入直流系统的有功功率，计算公式为式(1)； $N_B$  表示节点集合。

当元件停运，为避免出现连锁跳闸或功率不平衡的情况，需要采取有功发电再调度和输电减载措施，以消除系统约束违限；同时尽可能避免负荷削减，或者在无法避免时使负荷削减最小。首先考虑计及机组调节效应的发电再调度策略，当调度机组出力不能满足负荷需求和线路安全约束时采用输电减载措施，在合理的位置切除负荷以避免线路过

载和保护连锁跳闸。

以有功切负荷量最小为目标的线性规划模型为:

(1) 目标函数。

$$J = \min \sum \Delta P_{Li} \quad (9)$$

如果考虑到经济性,可采用以电厂成本和负荷停电成本在内的总运行最小为目标函数,其表达式为

$$J = \min \left\{ \sum_{i \in N_G} C_{Gi} P_{Gi} + \sum_{i \in N_D} C_{Li} \Delta P_{Li} \right\} \quad (10)$$

式中:  $N_G$  和  $N_D$  分别表示发电机集合和负荷节点集合;  $C_{Gi}$  和  $C_{Li}$  分别为发电成本和切负荷成本,如果是水电机组或核电机组其发电成本应该比火电机组小。

考虑到柔性直流输电系统功率调节的瞬时性,优化模型中可改变直流输送功率作为系统故障后消除线路过负荷的一种重要措施。

(2) 约束条件。

1) 节点功率平衡约束

$$P_i = P_{Gi} - (P_{Li} - \Delta P_{Li}) \quad (11)$$

如果是与直流线路相连的节点还要考虑交流线路流入直流线路的功率。

2) 线路载荷约束

$$|P_{ij}| \leq P_{ij \max} \quad (12)$$

3) 发电机出力约束

$$P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max} \quad (13)$$

基于电网运行特点,在有限时间内,备用容量不一定能完全投入运行,发电机的出力调整受当前出力  $P_{Gi}^{(0)}$ 、爬坡速度  $v_{up}$ 、降出力速度  $v_{dn}$ 、调节时间  $\Delta T$  限制,发电机出力约束可修正为

$$P_{Gi \min} \leq P_{Gi}^{(0)} - v_{dn} \Delta T \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{(0)} + v_{up} \Delta T \leq P_{Gi \max} \quad (14)$$

4) 切负荷约束

$$0 \leq \Delta P_{Li} \leq P_{Li} \quad (15)$$

5) 考虑到 VSC-HVDC 直流线路的有功可以反转,约束条件

$$-P_{dc \max} \leq P_{dc} \leq P_{dc \max} \quad (16)$$

## 4 指标计算

电力系统运行风险的基本定义是:“对电力系统面临的不确定性因素给出可能性与严重性的综合度量”,如果故障集合可以穷举,风险指标可描述为<sup>[14]</sup>

$$R_{\text{Risk}}(X_f) = \sum_i P_r(E_i) \cdot f_{\text{Sev}}(E_i, X_f) \quad (17)$$

式中:  $X_f$  为当前的运行方式;  $E_i$  为第  $i$  个故障模式;  $P_r(E_i)$  为  $E_i$  出现的概率;  $f_{\text{Sev}}(E_i, X_f)$  为在当前运行

方式下  $E_i$  发生后系统的严重程度。风险指标  $R_{\text{Risk}}(X_f)$  实际是上述各指标的期望值。

假设  $N_S$  为随机抽样次数,  $N_{FS}$  为切负荷次数,第  $i$  次抽样得到的停电功率为  $P_i$ , 停电电量为  $W_i$ , 停电时间为  $T_i$ , 停电损失为  $C_i$ , 则系统的风险指标如下<sup>[15]</sup>:

(1) 停电概率期望值

$$P_{\text{LOLP}} = N_{FS} / N_S \quad (18)$$

(2) 停电功率期望值

$$P_{\text{EPNS}} = \frac{1}{N_S} \sum_{i=1}^{N_S} P_i \quad (19)$$

(3) 停电电量期望值

$$W_{\text{EENS}} = \frac{1}{N_S} \sum_{i=1}^{N_S} W_i = \frac{1}{N_S} \sum_{i=1}^{N_S} P_i \cdot T_i \quad (20)$$

(4) 停电损失期望值

$$C_{\text{LOLC}} = \frac{1}{N_S} \sum_{i=1}^{N_S} C_i \quad (21)$$

式中  $C_i = \sum_{j=1}^{N_D} C_{Lj} \Delta P_{Lj}$ 。

## 5 算例分析

根据本文的模型,对 IEEE-RTS24 系统进行仿真,该测试系统总装机容量为 3 405 MW, 峰荷为 2 850 MW, 包含 24 个节点(其中有 17 个负荷节点)、34 条线路和 32 台发电机,该测试系统线路全部由交流线路组成<sup>[16]</sup>。为计算本文停电损失期望值指标  $C_{\text{LOLC}}$ ,除了文中已经给出的发电成本以外,还增加了节点负荷的停电成本。

为测试本文的算法,对该测试系统进行改造,由于柔性直流输电采用电缆输电,对系统中的电缆线路进行改造比较合理。现比较以下 4 种方案:①方案 1, 原本的交流系统,未做改造;②方案 2, 节点 1、2 之间的电缆线路用柔性直流输电代替;③方案 3, 节点 6、10 之间的电缆线路用柔性直流线路代替;④方案 4, 以上 2 条电缆线路全部用直流线路代替。此时,柔性直流输电只考虑 0 备用,其故障率  $l = 5.24$ , 修复率  $m = 791.5$ 。经过计算,节点的可靠性指标如表 1 所示,目标函数是停电功率最小。

由表 1 可以看出,柔性直流输电从节点 1、2 接入,节点的停电概率  $P_{\text{LOLP}}$  和停电电量期望值  $W_{\text{EENS}}$  指标都降低了,但从节点 6、10 接入时,  $P_{\text{LOLP}}$  和  $W_{\text{EENS}}$  不但没有降低,反而提高了。由于节点 1、

表1 VSC-HVDC接入不同节点的可靠性指标

Tab. 1 Reliability indices under different incorporation bus

节点	方案1		方案2		方案3		方案4	
	$P_{LOLP}$	$W_{EENS}/$ (MWh/a)	$P_{LOLP}$	$W_{EENS}/$ (MWh/a)	$P_{LOLP}$	$W_{EENS}/$ (MWh/a)	$P_{LOLP}$	$W_{EENS}/$ (MWh/a)
1	0.008 5	99.07	0.002 4	19.71	0.002 7	23.72	0.001 0	10.99
2	0.003 1	29.13	0.001 6	15.58	0.002 5	22.30	0.001 1	12.77
6	0.001 7	22.98	0.007 3	119.53	0.015 6	195.57	0.004 2	51.60
10	0.001 4	23.85	0.003 8	65.73	0.001 5	15.55	0.001 5	28.37

2上都有电源,如果节点附近的某个元件发生故障,换流器就可迅速调节提高或降低VSC-HVDC传输的功率,调整系统的功率平衡,从而避免切负荷。因此在选择VSC-HVDC在输电网络的安装位置时,最好是接入两端都有电源支持的系统中,以取得最佳效果。

如果考虑到经济因素,以发电成本和停电成本在内的总运行成本最小为目标函数时,计算的结果如表2所示。可以看出,当采用VSC-HVDC接入时系统的 $W_{EENS}$ 、 $P_{EPNS}$ 和 $C_{LOLC}$ 等可靠性指标都降低了,因此在考虑运行成本的情况下,VSC-HVDC的使用会使系统的可靠水平有所提高。

表2 成本最小为目标函数的可靠性指标

Tab. 2 Reliability indices based on the target of the least cost

	方案1				方案2			
	$P_{LOLP}$	$W_{EENS}/$ (MWh/a)	$P_{EPNS}/$ MW	$C_{LOLC}/$ 万元	$P_{LOLP}$	$W_{EENS}/$ (MWh/a)	$P_{EPNS}/$ MW	$C_{LOLC}/$ 万元
系统	0.448 5	56 778.91	555.53	1 135.56	0.448 5	56 587.21	552.74	1 133.02
节点1	0.299 5	2 777.58	32.16	55.55	0.055 3	791.15	8.29	15.82
节点2	0.243 2	1 666.27	20.64	33.33	0.120 5	1 332.14	10.05	26.64

采用1备用时,系统和节点的可靠性指标计算结果和0备用比较如表3所示(采用方案2),在无法提高元件可靠性技术指标的情况下,可通过增加备用改善系统的可靠性指标。

表3 VSC-HVDC不同备用下的可靠性指标(方案2)

Tab. 3 Reliability indices under different spares (scheme 2)

	0备用				1备用			
	$P_{LOLP}$	$W_{EENS}/$ (MWh/a)	$P_{EPNS}/$ MW	$C_{LOLC}/$ 万元	$P_{LOLP}$	$W_{EENS}/$ (MWh/a)	$P_{EPNS}/$ MW	$C_{LOLC}/$ 万元
系统	0.060 4	1 275.91	9.382 4	25.518 2	0.060 1	1 264.76	9.308 4	25.295 1
节点1	0.002 4	19.71	0.191 8	0.394 2	0.002 4	20.52	0.197 2	0.410 4
节点2	0.001 6	15.58	0.123 2	0.311 6	0.001 6	15.58	0.123 2	0.311 6

## 6 结论

建立了含VSC-HVDC混合发输电系统的可靠性分析模型,用VC++实现对含有VSC-HVDC的IEEE-RTS24系统仿真,计算系统节点停电概率、停电电量期望值等可靠性指标和停电损失等经济

指标。通过计算验证了VSC-HVDC连接到两端有电源的节点中,其对系统可靠性提高的影响比较大。最后还分析了在不同的备用下,VSC-HVDC对系统停电电量期望值的影响,在不能提高元件本身可靠性的情况下,适当增加备用有助于提高系统的可靠性。计算和结果分析为设计和规划部门合理选择VSC-HVDC的接入方案,提供了一定的参考价值。

## 参考文献

- [1] Asplund G, Eriksson K, Svensson K. DC transmission based on voltage source converters[C]. CIGRE SC14 Colloquium, South Africa, 1997.
- [2] Eriksson K, Graham J. HVDC light a transmission vehicle with potential for ancillary services[C]. SEPOPE, Curitiba, Brazil, 2000.
- [3] Johansson S, Asplund G, Jansson E, et al. Power system stability benefits with VSC DC-transmission systems[C]. CIGRE Conference, Paris, France, 2004.
- [4] Zhang Lidong, Harnfors L. Power system reliability and transfer capability improvement by VSC-HVDC[C]. CIGRE Regional Meeting, Tallinn, Estonia, 2007.
- [5] 文俊, 张一工, 韩民晓, 等. 轻型直流输电——一种新一代的HVDC技术[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 47-51.  
Wen Jun, Zhang Yigong, Han Minxiao, et al. HVDC based on voltage source converter—a new generation of HVDC technique[J]. Power System Technology, 2003, 27(1): 47-51(in Chinese).
- [6] 丁明, 张瑞华. 发输电组合系统可靠性评估的蒙特卡罗模拟[J]. 电网技术, 2000, 24(3): 9-12.  
Ding Ming, Zhang Ruihua. Monte-carlo simulation of reliability evaluation for composite generation and transmission system [J]. Power System Technology, 2000, 24(3): 9-12(in Chinese).
- [7] 丁明, 李生虎, 吴红斌. 电力系统概率充分性和概率稳定性的综合评估[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 20-25.  
Ding Ming, Li Shenghu, Wu Hongbin. Integrated evaluation of power system adequacy and stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 20-25(in Chinese).
- [8] 任震, 武娟, 陈丽芳. 高压直流输电可靠性评估的等效模型[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(9): 38-41.  
Ren Zhen, Wu Juan, Chen Lifang. Equivalent model for HVDC reliability evaluation[J]. Automaton of Electric Power Systems, 1999, 23(9): 38-41(in Chinese).
- [9] 任震, 何建军, 谌军, 等. 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): 14-19.  
Ren Zhen, He Jianjun, Chen Jun, et al. Monte-carlo FD comprehensive method for reliability evaluation of AC/DC hybrid network system[J]. Power System Technology, 2000, 24(5): 14-19(in Chinese).
- [10] 张桂斌, 徐政, 王广柱. 基于VSC的直流输电系统的稳态建模及其非线性控制[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 17-22.  
Zhang Guibin, Xu Zheng, Wang Guangzhu. Steady-state model and its nonlinear control of VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 17-22(in Chinese).
- [11] 王冠, 蔡晔, 张桂斌, 等. 高压直流输电电压源换流器的等效模

型及混合仿真技术[J]. 电网技术, 2003, 27(2): 4-8.

Wang Guan, Cai Ye, Zhang Guibin, et al. Equivalent model of VDC-VSC and its hybrid simulation technique[J]. Power System Technology, 2003, 27(2): 4-8(in Chinese).

- [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.
- [13] 李文沅. 电力系统风险评估模型、方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [14] Ni Ming, McCalley J D, Vittal V, et al. Online risk-based security assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(1): 258-265.
- [15] 丁明, 孙昕, 胡昭明. 大型电力系统可靠性评价体系(II)算法[J]. 合肥工业大学学报, 1998, 21(6): 1-6.
- Ding Ming, Sun Xin, Hu Zhaoming. Reliability indices frame work for bulk power system(II) algorithms[J]. Journal of Hefei University of Technology, 1998, 21(6): 1-6(in Chinese).

(上接第 31 页 continued from page 31)

- [6] Lasseter R H. Micro grids[C]. Power Engineering Society Winter Meeting, New York, 2002.
- [7] Lasseter R, Akhil A, Marmay C, et al. Integration of distributed energy resources: the certs microgrid concept[EB/OL]. <http://certs.lbl.gov/pdf/50829.pdf>, 2007-04-01.
- [8] Marnay C, Rubio F J, Siddiqui A S. Shape of the microgrid [EB/OL]. <http://repositories.cdlib.org/cgi/viewcontent.cgi?article=3379&context=lbln>, 2007-01-01.
- [9] Hatzigiargyriou N, Asano H, Iranvani R, et al. Microgrids[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(4): 78-94.
- [10] Hatzigiargyriou N D, Dimeas A, Tsikalakis A G, et al. Management of microgrids in market environment[C]. International Conference on Future Power Systems, Amsterdam, 2005.
- [11] Markvart T. Microgrids-power systems for the 21st Century [J]. Refocue, 7(4): 44-48.
- [12] 盛聘, 孔力, 齐智平, 等. 新型电网—微电网(Microgrid)研究综述 [J]. 继电器, 2007, 35(12): 75-81.
- Sheng Kun, Kong Li, Qi Zhiping, et al. A survey on research of microgrid-a new power system[J]. Relay, 2007, 35(12): 75-81.
- [13] Funabashi T, Yokoyama R. Microgrid field test experiences in Japan[C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montréal, 2006.

- [16] Reliability Test System Task Force of the IEEE Subcommittee on the Application of Probability Methods. IEEE reliability test system [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(6): 2047-2054.



丁明

收稿日期: 2008-03-20。

作者简介:

丁明(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统规划及可靠性、新能源及其利用、分布式发电、电力市场等, E-mail: mingding56@126.com;

李小燕(1979—), 女, 博士研究生, 研究方向为电力系统可靠性分析, E-mail: leexiaoyan2002@163.com。

(责任编辑 马晓华)

- [14] Stevens J, Klapp D. CERTS microgrid system tests[J]. Power Engineering Society General Meeting, Tampa, 2007.
- [15] Lasseter R H. CERTS microgrid[J]. IEEE International Conference on System of Engineering, San Antonio, 2007.
- [16] European Commission. Strategic research agenda for Europe's Electricity Networks of the Future[EB/OL]. [http://www.sm-artgrids.eu/documents/sra/sra\\_finalversion.pdf](http://www.sm-artgrids.eu/documents/sra/sra_finalversion.pdf), 2007-05-01.
- [17] Sanchez M. Overview of microgrid research and development activities in the EU[C]. Montreal 2006-Symposium on Microgrids, 2006.
- [18] Tsuji K. FRIENDS in the context of microgrid research [EB/OL]. [http://der.lbl.gov/new\\_site/2005microgrids\\_files/presentaion\\_pdfs/CERTS-tsuji.pdf](http://der.lbl.gov/new_site/2005microgrids_files/presentaion_pdfs/CERTS-tsuji.pdf), 2006-10-17.
- [19] Morozumi S. Micro-grid demonstration projects in Japan[C]. Power Conversion Conference, Nagoya, 2007.



郑漳华

收稿日期: 2008-03-26。

作者简介:

郑漳华(1985—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网及电能质量, E-mail: lokey@sju.edu.cn;

艾芊(1969—), 男, 副教授, 研究方向为 FACTS 技术及分布式发电, E-mail: aiqian@sju.edu.cn。

(责任编辑 王金芝)

## 中国电力科学研究院总工程师周孝信院士荣获 IEEE PES 2008 Nari Hingorani FACTS 贡献奖

2008年7月20—24日, IEEE PES 2008大会在美国匹兹堡召开。来自全世界的2000多名电力工作者参加了会议, 进行技术讨论、论文宣读、展览等交流活动。此次会议上, 中国电力科学研究院总工程师周孝信院士被IEEE PES学会授予2008 Nari Hingorani FACTS贡献奖, IEEE PES主席Wanda K. REDER向周孝信院士颁发了获奖证书和奖牌。Nari Hingorani FACTS贡献奖由IEEE PES学会于1999年设立, 在世界范围内奖励对FACTS的科研和应用做出重要贡献的人。周孝信院士是本年度该奖项的唯一获奖人, 也是该奖项设立来第一位获奖的中国人。

周孝信院士在会议上发表了获奖感言。他表示该项奖励是中国电力科学研究院FACTS研发和推广科研人员的共同荣誉。正是在众多科研人员的共同努力下, 中国建成了世界上容量最大的TCSC项目——伊冯串补工程, 该工程于2007年10月投入运行。随着中国特高压、大容量电网的建设, 中国电科院将继续开展FACTS技术的深入研究, 推动FACTS设备在中国电网的高效应用。