

基于全寿命周期理念的 500 kV 变电站初期主接线选择

查申森¹, 郑建勇¹, 胡继军²

(1. 东南大学 电气工程学院, 江苏省 南京市 210096; 2. 江苏省电力设计院, 江苏省 南京市 211102)

Selection of Main Electrical Connection of a 500 kV Substation in Initial Stage Based on Idea of Life Cycle

ZHA Shen-sen¹, ZHENG Jian-yong¹, HU Ji-jun²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China;

2. Jiangsu Electric Power Design Institute, Nanjing 211102, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: Based on the management idea of life cycle, a two dimensional technical system is constructed by engineering breakdown structure (EBS) and object breakdown structure (OBS) for the design of substation life cycle. Taking the selection of main electrical connection in initial stage of 500 kV Anqing substation for example, the qualitative analysis and quantitative calculation of reliability and security of three alternative electrical connection schemes are performed; the extensibilities in the three schemes to ensure the uninterrupted power supply of main transformers during the transition period, when main primary and secondary equipments are extended, are compared; and the life cycle costs of these schemes are estimated. Thus taking the least investment and the most economic present value as the indices of cost optimization, the line-transformer units are finally chosen as the main electrical connection scheme in the initial stage. The factors that should be emphatically considered during the selection of main electrical connection scheme of 500 kV substation in the initial stage are pointed out.

KEY WORDS: life cycle cost (LCC); 500 kV substation; main electrical connection; reliability and security; extensibility

摘要: 立足于全寿命周期管理理念, 提出以系统分解结构和设计目标分解结构构建变电站全寿命周期设计 2 维技术体系。以安庆 500 kV 变电站初期主接线选择为例, 对 3 种备选接线方案的可靠性与安全性进行了定性分析和定量计算, 比较了各方案主要的一、二次设备扩建过渡期间保证主变连续供电的可扩展性, 对各方案全寿命周期成本进行估算, 以投资最少、现值最省作为成本最优化指标, 最终选择线路-变压器组作为初期主接线方案, 指出了选择 500 kV 变电站初期主接线方案时应着重考虑的因素。

关键词: 全寿命周期成本; 500 kV 变电站; 电气主接线; 可靠性与安全性; 可扩展性

0 引言

全寿命周期管理是目前国家电网公司积极推行的一项实践和创新项目^[1]。2008 年 5 月, 国家电网公司以安徽 500 kV 安庆变电站作为试点, 组织全国主要电力设计院开展设计竞赛, 旨在积极推进全寿命周期管理在电力设计建设中的应用。全寿命周期是指工程项目从概念阶段到最终报废的整个寿命周期, 包括意向阶段、可行性研究阶段、规划阶段、设计阶段、建造阶段、运营阶段、技术改造阶段及回收阶段等^[2-6]。全寿命周期管理是指运用系统论、控制论和信息论的思想, 将工程整个寿命周期的各个阶段以及各参与单位和部门在管理理念、管理目标、管理组织、管理方法、管理手段等各方面进行有机集成的管理模式。

将全寿命周期管理理念引入变电站设计环节, 能有效避免设计阶段可能发生的短期行为, 使设计从项目伊始就立足于变电站工程的全寿命周期, 考虑变电站工程全寿命的成本最优、精益建设、环境友好、资源集约利用等因素, 提出具有良好经济效益和社会效益的变电站工程最佳设计方案。

本文将以 2008 年国家电网公司设计竞赛依托工程——安徽安庆 500 kV 变电站为例, 探讨用全寿命周期管理的理念选择 500 kV 变电站初期电气主接线的整体思路、方法和建议。

1 初期电气主接线方案

1.1 安庆 500 kV 变电站建设规模

根据《安徽 500 kV 安庆等输变电工程可行性

研究报告评审意见》，安庆 500 kV 变电站远期规划装设 3 台 750 MVA 主变压器，500 kV 出线 9 回，分别为至庐桐变 2 回，淮南方向 2 回，核电方向 2 回，抽水蓄能电厂方向 1 回，过江方向备用 2 回。500 kV 配电装置按 3/2 断路器接线，采用断路器三列式布置。3 台主变及 9 回出线组成 6 个完整串。按照电源回路尽量与负荷回路配对成串，同名回路配置在不同串内的原则，根据本工程的特点，远近期结合，方便扩建过渡，500 kV 安庆站远期电气主接线见图 1。

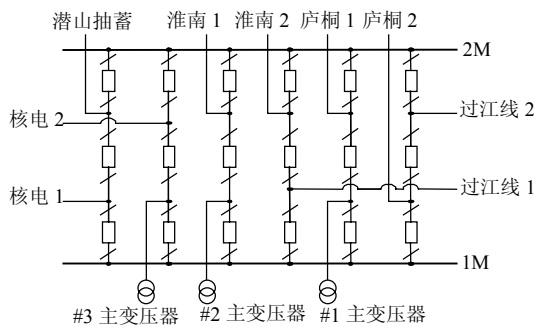
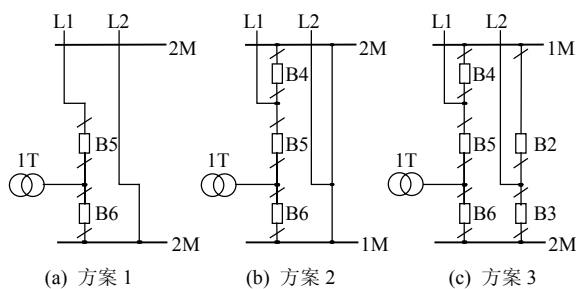


图 1 500 kV 安庆站远期电气主接线

Fig. 1 Prospective main electrical connection of 500 kV Anqing station

1.2 初期主接线方案

安庆 500 kV 变电站初期 500 kV 出线 2 回(至庐桐)，主变压器 1 台，元件数为“2 线 1 变”，2 线来自同一电源点。兼顾可靠、灵活、节约和便于扩建等要素^[7]，对 500 kV 初期主接线提出 3 种方案进行比较，分别为：1) 方案 1，线路-变压器组接线(2 台断路器)；2) 方案 2，三角形接线(3 台断路器)；3) 方案 3，3/2 断路器接线(5 台断路器)。以上 3 种接线方案如图 2 所示。



(a) 方案 1 (b) 方案 2 (c) 方案 3

L1—500 kV 庐桐 2 线；L2—500 kV 庐桐 1 线；
1T—#1 主变压器； $B_n(n=0, 1, 2, \dots)$ —断路器。

图 2 500 kV 安庆站初期电气主接线方案

Fig. 2 Main electrical connection of 500 kV Anqing station in initial stage

1.3 主接线方案分析的 2 维体系

对变电站进行全寿命周期设计，需要对变电站设计的内涵进行研究，从设计角度对变电站工程总体目标进行结构分解，形成目标分解结构(object

breakdown structure, OBS)。变电站全寿命周期设计目标可归纳为：可靠性与安全性、易维护性、易施工性、可扩展性、节约环保性、可回收性、防灾和突发事件处理、全寿命周期成本最优化^[8]。

此外，全寿命周期设计还要求对变电站进行工程系统分解(engineering breakdown structure, EBS)，即按变电站技术特点和设计管理的需要，将变电站按专业分解成各个技术系统。电气主接线就是其中一个系统，亦即是一个 EBS。

将变电站工程 EBS 和 OBS 按 2 维结构关系一一对应，就构建了变电站全寿命周期设计技术体系。对初期主接线设计而言，需将其与 8 个 OBS 一一对应，形成全寿命周期设计的 2 维对应关系。同时需要考虑其适用性与协调性。首先，初期主接线设计不可能满足每个 OBS 子目的要求，即需要考虑初期主接线对于本 OBS 子目的适用性，判断初期主接线是否具有实现本 OBS 子目的技术手段及措施。其次，每个 OBS 子目的要求常常是矛盾的，比如要做好可靠性与安全性设计这个目标时可能不能满足全寿命周期成本最优的目标，所以对于初期主接线对应的所有 OBS 子目，需要考虑各 OBS 子目之间的内在协调性，最终达到整个设计目标的协调最优。

对初期主接线进行分析选择时，主要从可靠性与安全性、可扩展性、全寿命周期成本最优化等 3 个方面进行研究。

2 可靠性与安全性分析

2.1 分析准则

可靠性是指变电站在运营时不发生故障；安全性是指变电站在运营时不发生事故。可靠性下降，可能诱发事故；而事故发生时，设备的性能往往下降或无法运营，也影响了工程的可靠性。

工程初期只有 1 台主变压器，由同一电源点经同名双回路供电，无系统联络及穿越功率的可能，因此，保证变电站主变压器的供电可靠性是衡量 500 kV 初期主接线可靠性的重要准则^[9]。

2.2 定性分析

1) 正常运行状态。

3 种方案主接线所有设备均投入运行。

2) 事故状态^[9]。

当 1 条线路故障时，方案 1~3 均能保持线路-变压器组接线方式正常运行。

当主变故障时,全站停电,方案1~3的供电可靠性相同。

当1台断路器故障时,方案1~3均可在短时间内恢复线路-变压器组运行。

当1条线路故障,1台断路器拒动时,方案1~3的主变均退出运行(当L2线路故障、B5断路器拒动时,方案3主变退出运行),打开拒动断路器两侧隔离开关后线路-变压器组方式恢复运行。

3) 检修状态^[9]。

当1台断路器检修时,3种接线方案均能保持线变组方式正常运行。

当1台断路器检修,1条线路故障时,方案1主变退出运行;方案2、3的主变均有可能退出运行。

2.3 定量分析

2.3.1 原始数据

表1中各参数值为定量分析提供了原始数据。

表1 可靠性计算的原始数据

Tab.1 Initial data for reliability accounting

参数名称	数值
断路器大修周期/a	5
断路器小修周期/a	1
断路器大修时间/(h/次)	500
断路器小修时间/(h/次)	25
断路器故障平均修复时间 T_S /h	50
断路器故障查明时间 T_C /h	0.3
断路器故障率 λ_{BZ} /(次/(a·台))	0.053 08
隔离开关分、合1次时间 T_L /h	0.1
隔离开关检修时间/h	8
隔离开关故障率 λ_{DZ} /(次/(a·台))	0.01
线路检修周期/(次/(a·百 km))	3
线路检修平均时间/h	8
线路故障修复时间 T_{TS} /h	20
线路故障率 λ_S /(次/(a·百 km))	0.115
线路长度/km	57.2
变压器故障平均修复时间 T_{TS} /h	90
变压器故障率 λ_{TZ} /(次/(a·台))	0.025 45
母线检修时间或母线故障平均修复时间 T_{MS} /h	10
母线故障率 λ_{MZ} /(次/(a·条))	0.006

2.3.2 可靠性计算

对变电站电气主接线可靠性的定量分析方法较多,常见的有逻辑表格法^[10]、Markov过程、统一 $n+2$ 状态 Markov 模型^[11-12]、状态空间法、网络法、最小割集法、频率和持续时间法、Monte Carlo 模拟法^[13]、区间分析法^[14]等。

逻辑表格法是电气主接线可靠性计算中常用的一种方法,这种方法根据电气主接线的实际接线,考虑设备处于全部完好、设备单重故障(主要是线路、断路器、继电保护故障)及双重故障的所有可

能情况,将待分析设备元件(或回路)被故障切除的状态一一列举出来,填入典型表格中,根据可靠性指标的定义,用概率公式计算出某设备元件(或回路)在1a内的停运率、停运时间等可靠性指标^[13]。

本文采用逻辑表格法填表计算,根据不同的设定条件,归纳整理出各种计算结果,详见表2、3。表2为考虑各元件故障及断路器检修组合,各方案主接线整体的可靠性计算结果。表3为考虑线路、母线及断路器故障和断路器检修的组合造成主变停运,各方案主变压器运行的可靠性计算结果。

表2 各主接线方案整体的可靠性计算结果

Tab.2 Numerical results of overall reliability of main electrical connection proposals

方案	停运率/(次/a)	停运时间/(h/a)	停时系数/ 10^{-5}
1	0.648 27	31.22	356.43
2	0.872 55	10.73	122.46
3	0.868 69	11.35	129.61

表3 各主接线方案主变压器供电可靠性计算结果

Tab.3 Numerical results of main transformer's power supply reliability of main electrical connection proposals

方案	停运率/(次/a)	停运时间/(h/a)	停时系数/ 10^{-5}
1	0.146 04	0.184 14	2.10
2	0.218 20	0.220 97	2.52
3	0.150 95	0.280 93	3.21

2.3.3 计算结果分析

由表2、3可见,如果研究各接线方案整体的可靠性,因方案1元件最少,所以停运率较低,但由于其元件少,恢复正常方式时间相对较长。方案2、3停运率及停运时间相当。

根据本工程初期2线1变的特点,重点研究其他元件对主变压器供电可靠性的影响。方案1的主变停运时间较短,方案2、3较长。方案1停运率较低,因此方案1主变供电可靠性较高,方案3次之,方案2较差。

3 可扩展性分析

3.1 电气一次设备扩建过渡

500 kV 初期主接线过渡至远景3/2断路器接线方式时,应分析其扩建过渡时变电站的不停电可行性,以符合可扩展性设计的要求。

本工程计划于2009年建成并投入运行。投运年为1台500 kV主变压器,2回500 kV线路接至500 kV庐桐变电站。根据系统的远期规划,本工程远景建设方案有下列步骤:

1) “十二五”末期,扩建过江1、2线,将初期

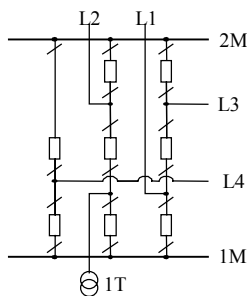
L1、L2 线路串建成完整串，另新建 1 个不完整串。

2) “十三五”初期，扩建核电 1、2 线，潜山抽蓄线和#2 主变压器，新建 1 个完整串和 2 个不完整串。

3) “十三五”中期，扩建淮南 1、2 线和#3 主变压器，按远期规模建成。

本文只对 500 kV 初期主接线过渡至步骤 1 的扩建方案进行分析，步骤 2、步骤 3 的扩建基于步骤 1 开展，分析原则同步步骤 1，文中不予叙述。

“十二五”末期扩建过渡的 500 kV 主接线如图 3 所示。



L1—500 kV 过江 2 线；L2—500 kV 过江 1 线。

图 3 500 kV 扩建过渡电气主接线

Fig. 3 500 kV main electrical connection during the extended transition period

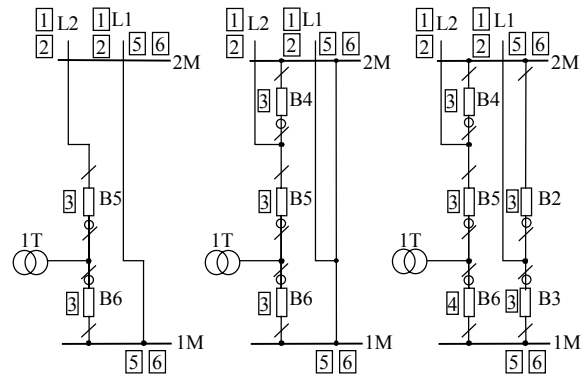
对 3 种初期接线方案一次设备的扩建步骤 1 进行分析可知：当 500 kV 配电装置扩建时，3 种方案均不影响主变压器的正常连续供电。方案 3 由于过渡支持绝缘子及其支架的拆除，土建工程量较大，方案 1、方案 2 中的一条线路停电时间略长。

3.2 二次设备扩建过渡

500 kV 初期主接线的 3 种方案，其扩建过渡时对系统保护配置及改接的影响程度各异，而计算机监控系统、电能量计量、交直流系统等二次设备的配置初期工程均已结合远期考虑或差异较小，因此重点分析 3 种方案扩建过渡时对 500kV 系统保护的影响。本工程投产年 3 种电气主接线对应的 500 kV 保护配置方案见图 4。扩建过渡的 500kV 系统保护配置方案如图 5 所示。

对 3 种 500 kV 主接线方案系统保护的扩建步骤进行分析可知：当 500 kV 配电装置扩建时，各接线方案的保护与电流互感器二次绕组的接线均有改动，保护改接应尽量配合一次设备扩建同步进行。各方案扩建时的保护改接均能保证主变压器正常运行。

方案 1 扩建时需 L1、L2 轮停进行保护改接，但其在过渡时仍能保持初期工程线路-变压器组接



- 1—500 kV 线路分相电流差动保护 1；
- 2—500 kV 线路分相电流差动保护 2；
- 3—500 kV 断路器失灵保护(带重合闸功能)；
- 4—500 kV 断路器失灵保护(不带重合闸功能)；
- 5—500 kV 第 1 套母线保护；
- 6—500 kV 第 2 套母线保护。

图 4 初期 500 kV 系统保护配置方案

Fig. 4 500 kV protection configuration in initial stage

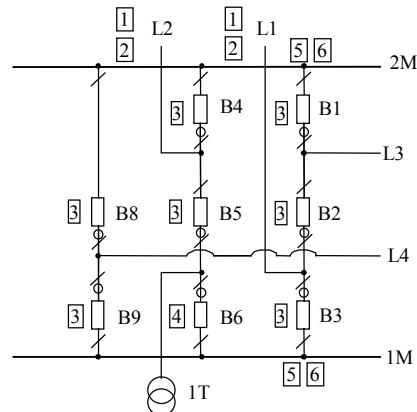


图 5 扩建过渡 500 kV 系统保护配置方案

Fig. 5 500 kV protection configuration during the extended transition period

线的正常运行。

方案 2 扩建时 L1 线路需要停运，其过渡时实质上以线路-变压器组接线方式运行。

方案 3 扩建时 L1、L2 不停运，但 B2、B4 断路器需打开，其过渡时实质上也以线路-变压器组接线方式运行，与方案 1 相比，虽然 L1、L2 不停运，但 L1—1T、L2—1T 每个单元比方案 1 均多了 1 台断路器，这也增加了故障的几率，影响了线路-变压器组接线运行的可靠性。

对 3 种初期接线方案二次设备的扩建步骤 1 进行分析可知：方案 1、2、3 二次设备(主要是保护设备)扩建过渡时实质上均以线路-变压器组的方式运行，对线路对侧没有影响，3 种方案对主接线可靠性的影响基本相当。

3.3 扩建过渡的工程量

表 4 给出了 3 种接线方案扩建过渡时主要的工

表4 各方案扩建过渡的主要工程量

Tab. 4 Main project quantity of the proposals during the extended transition period

项目	方案1	方案2	方案3
断路器安装台数	6	5	3
隔离开关安装台数	12	10	6
电流互感器安装台数	18	15	9
电压互感器安装台数	2	2	0
母线保护安装台数套数	4	4	0
重合闸、断路器失灵保护安装套数	6	5	3
重合闸、断路器失灵保护停用重合闸功能套数	1	1	0
线路保护安装套数	4	4	4
线路保护改接套数	2	2	0
支持绝缘子安装数/只	15	12	9
母线保护改接套数	0	0	2
过渡支持绝缘子拆除数/只	0	0	3

程量。由表4可知,新增扩建的一次设备安装量,方案1最大,方案2次之,方案3最小。此外,方案3需拆除3只支持绝缘子及其支架。新增扩建的二次设备安装量,方案1仅比方案2多安装1套断路器失灵保护(带重合闸),比方案3多安装3套断路器失灵保护(带重合闸)和4套母线保护。

4 全寿命周期成本最优化分析

全寿命周期成本(life cycle cost, LCC)最优是变电站工程全寿命周期设计建设中最重要目标之一,贯穿体现在全寿命周期管理的各个目标中。LLC是指为获得大型系统以及系统整个运行寿命期所消耗的总费用,包括开发购置、使用、保障和报废等费用^[1,15]。

500 kV变电站初期3种电气主接线方案,在“十二五”末期扩建后均达到相同接线,但初期投资各异。表5对3种主接线方案相应的500 kV配电装置初期工程有差异部分进行了比较,并且列出主要工程量的项目,如一次设备、二次设备等。对于诸如二次电缆、设备引线等装置性材料、安装费用及其他费用等参照同类工程或按标准规定的百分率计列。

3种主接线方案的经济比较结果详见表5。从表5可以看出,方案1接线初期工程的投资最省,方案3接线初期工程的投资最大。方案1比方案3初期投资节省1 088万元。

按照系统规划远景建设方案,“十二五”末期扩建过江1、2线,与本期建设间隔约5 a以上,经估算,方案1投资现值比方案3节省约342万元,且从全寿命周期角度考虑,在保证实现可靠、灵活、

表5 500 kV初期主接线方案经济比较

Tab. 5 Economic comparison of proposals in initial stage

项目	单位	单价/万元	方案1		方案2		方案3	
			数量	价格/万元	数量	价格/万元	数量	价格/万元
A	台	165	2	330	3	495	5	825
B	台	19.5	6	117	9	175.5	15	292.5
C	组	30	1	30	2	60	4	120
D	组	60	2	120	2	120	3	180
E	组	13	0	0	0	0	4	52
F	台	7.9	9	71.1	9	71.1	11	86.9
G	台	4.4	18	79.2	18	79.2	18	79.2
H	套	8	0	0	0	0	1	8
I	套	10	2	20	3	30	4	40
J	套	20	0	0	0	0	4	80
K	支	1.5	3	4.5	6	9	15	22.5
L				30		38		62
M				43		58		85
总计				845		1 136		1 933
差额				0		291		1 088

注:A—断路器(SF₆); B—电流互感器(SF₆); C—垂直开启隔离开关(单接地); D—水平开启隔离开关(三柱式三接地); E—接地器; F—电压互感器; G—避雷器; H—断路器失灵保护; I—重合闸、断路器失灵保护; J—母线保护; K—支持绝缘子; L—设备基础费用; M—安装及其他费用。

便于扩建等功能的同时,应尽可能降低初期投资成本,因此,初期500 kV电气主接线推荐采用方案1线路-变压器组(2台断路器)接线方案。

5 结论

1)对变电站进行全寿命周期设计建设时,应由变电站工程EBS和OBS构建全寿命周期设计技术体系,并充分考虑各OBS子目之间的内在协调性,最终达到整个设计目标的协调最优。

2)500 kV变电站初期主接线选择时,应重点在可靠性与安全性、可扩展性、全寿命周期成本最优化等方面,对主接线各方案进行比选。所选方案的初期投资应最少、全寿命周期成本应最优、主变供电可靠性应最高,并在扩建过渡时能保证主变的正常连续供电。

参考文献

- [1] 史京楠,韩红丽,徐涛.全寿命周期成本分析在变电工程规划设计中的应用[J].电网技术,2009,33(9):63-66.
Shi Jingnan, Han Hongli, Xu Tao. Application of life cycle costs analysis in planning design of power transformation projects [J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 63-66(in Chinese).
- [2] 李洪东,冯义,刘中书.基于建设项目全寿命周期管理理念的金融输电权机制研究[J].电力建设,2008,29(4):24-27.
Li Hongdong, Feng Yi, Liu Zhongshu. Research on financial transmission right mechanism based on construction items' whole-life cycle management idea[J]. Electric Power Construction, 2008, 29(4):

- 24-27(in Chinese).
- [3] 葛维平. 电网建设项目应用全寿命周期成本控制分析[J]. 电力建设, 2009, 30(7): 92-94.
Ge Weiping. Discussion about full-life cycle cost control for power grid construction project[J]. Electric Power Construction, 2009, 30(7): 92-94(in Chinese).
- [4] 王德海, 张晓婉, 赵维宁. 现代项目管理理论与方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 5-8.
- [5] 殷可, 郁东升. 全寿命周期成本(LCC)在变电站主设备招标采购中的研究与实践[J]. 华东电力, 2009, 37(3): 436-439.
Yin Ke, Yu Dongsheng. Application of life cycle cost to bid-invitation and purchase of main substation equipment[J]. East China Electric Power, 2009, 37(3): 436-439(in Chinese).
- [6] 任国强, 董士波. 全寿命周期工程造价管理及其计算机实现[R]. 天津: 天津理工学院, 1994.
- [7] DL/T 5218—2005 220~500kV 变电所设计技术规程[S].
- [8] 赵宪博, 许巧祥. 城市轨道交通项目全寿命周期设计理念研究[J]. 城市轨道交通研究, 2009(7): 9-12.
Zhao Xianbo, Xu Qiaoxiang. Life-cycle design concept for urban mass transit projects[J]. Urban Mass Transit, 2009(7): 9-12(in Chinese).
- [9] 褚农, 卫银忠, 赵本林. 建设初期 500 kV 主接线可靠性分析论证[J]. 电力建设, 2004, 25(4): 21-27.
Chu Nong, Wei Yinzhong, Zhao Benlin. Analysis and demonstration of reliability of 500 kV main wiring at the first stage of construction[J]. Electric Power Construction, 2004, 25(4): 21-27(in Chinese).
- [10] 郭永基. 电力系统可靠性原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1986: 42-47.
- [11] Billiton R, Chen Hua, Zhou Jiaqi. Generalized $n + 2$ state system Markov model for station-oriented reliability evaluation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(4): 1511-1517.
- [12] 谢开贵, 董百强, 赵霞, 等. 大型(变)电站电气主接线可靠性综合分析系统[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(15): 89-92.
Xie Kaigui, Dong Baiqiang, Zhao Xia, et al. Design and application of reliability evaluation software for power stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(15): 89-92(in Chinese).
- [13] 黎红梅, 苑舜. 变电所电气主接线可靠性分析方法的研究[J]. 东北电力技术, 2008(1): 15-22.
Li Hongmei, Yuan Shun. A study on analyzing method of main electrical wiring reliability[J]. Northeast Electric Power Technology, 2008(1): 15-22(in Chinese).
- [14] 张鹏, 郭永基. 电气主接线可靠性评估的区间方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(19): 48-52.
Zhang Peng, Guo Yongji. Interval method for power station and substation reliability evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(19): 48-52 (in Chinese).
- [15] 李涛, 马薇, 黄晓蓓. 基于全寿命周期成本理论的变电设备管理[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 50-53.
Li Tao, Ma Wei, Huang Xiaobei. Power transformation equipment management based on life cycle cost theory[J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 50-53(in Chinese).



查申森

收稿日期: 2009-11-30。

作者简介:

查申森(1980—),男,江苏省电力设计院工程师,博士研究生,研究方向为电力电子与电力传动、特高压直流输电技术, E-mail: seuzss@sina.com;

郑建勇(1966—),男,教授,博士生导师,研究方向为电力电子与电力传动;

胡继军(1971—),男,高级工程师,研究方向为输变电工程电气设计。

(责任编辑 李兰欣)