

# 基于拓扑搜索的水电站辅机系统动态仿真建模

吴喜春<sup>1</sup>, 李咸善<sup>1</sup>, 陈铁<sup>1</sup>, 郭志峰<sup>2</sup>

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 国网丽水供电公司, 浙江 丽水 323000)

**摘要:** 应用拓扑搜索技术进行了水电站辅机系统的动态建模, 提出了适用于辅机管网系统的拓扑搜索算法, 建立了适用于动态计算的管网元件模型, 利用拓扑搜索结果合成了便于计算的管网回路, 建立相应的管网动态方程, 并应用线性化理论将互相耦合的非线性方程化成线性方程迭代求解。该算法快速、适应管网及其元件工况的复杂变化, 其计算模型能反映出辅机元件的中间过程, 拓扑搜索较好地处理了不通支路, 有效避免了管网计算的“死点”, “死网”问题。其算法和模型已经在某实际水电站的仿真系统中得到应用, 验证了算法和模型的有效性。

**关键词:** 水电站仿真; 拓扑搜索; 辅机系统仿真; 管网; 动态模型

## Dynamic simulating and modeling of hydropower auxiliary system based on topology searching

WU Xi-chun<sup>1</sup>, LI Xian-shan<sup>1</sup>, CHEN Tie<sup>1</sup>, GUO Zhi-feng<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering & Renewable Energy, Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. State Grid Lishui Power Supply Company, Lishui 323000, China)

**Abstract:** This paper uses the technology of topology searching to dynamic modeling for hydropower auxiliary system, puts forward the topology searching algorithm applicable to the auxiliary pipe network system, and establishes the pipe network component model suitable for the dynamic calculations, uses the results of topology searching to integrate the pipeline loop appropriate to calculation, and establishes corresponding dynamic equations of the pipe network in the model. A linear theory is applied to convert the mutual coupling non-linear equations into linear equations for solving it iteratively. This algorithm is very efficient and can adapt to the complex changes of pipe network and components working conditions. Its calculation model can reflect the changing processes of the auxiliary components among different states. Topology searching algorithm can deal with the isolating branch well, effectively avoid the problems of isolating nodes and sub-network in the pipe network calculations. Its algorithms and models have been applied in a real large hydropower simulation system, which validates the effectiveness of this algorithms and models.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277110).

**Key words:** hydropower simulation; topology searching; auxiliary systems simulation; pipe network; dynamic model

中图分类号: TV735; TP391.9 文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)11-0099-07

## 0 引言

水电站辅机系统仿真是水电站仿真的重要研究内容, 它包括全厂风、水、油系统及其辅助机械、电气设备及其控制系统。针对水电站辅机系统的仿真不但要准确地反映辅机正常、异常及故障的工作状态, 而且要准确地反映事故、故障的处理及其后续的动态过程。要解决这一问题, 辅机系统模型必须能主动反映系统在非特定状态下的状态演化过程, 而

形成具备自动拓扑结构分析的系统算法是建模的基础。

在水电站仿真培训系统的研究开发中, 具有良好的人机交互界面是研究热点之一。而逼真的图形界面是人机接口的重要组成部分。其中面向对象技术(OOT-Object Orient Technology)在解决图形化建模方面已经非常成熟<sup>[1-2]</sup>。而自动拓扑分析能力是图形化建模的技术基础。在水电站仿真中, 对于电力网络的拓扑分析主要有搜索法<sup>[3-5]</sup>, 矩阵法<sup>[6-7]</sup>, 有色 Petri 网模型方法<sup>[8]</sup>等等<sup>[9-10]</sup>, 基于电气部分的拓扑分析理论成熟, 应用广泛<sup>[11]</sup>。而对于管网系统的自动拓扑分析虽然也有较多应用<sup>[12]</sup>, 但应用拓扑

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51277110); 湖北国智恒三大电力科技有限公司研究生科研创新基金资助项目(HBGZH-201208)

搜索进行辅机系统动态仿真建模的文献还较少。这也主要是由于辅机系统本身的网络复杂性、多态性，以及辅机仿真设备多、控制多、过程多，发生在辅机上的操作行为多，而辅机系统的状态如正常、异常的、故障的，会随着操作行为、设备状态而变化，使得辅机仿真的自动拓扑算法难以实施。本文提出了适用于水电站辅机系统仿真的管道拓扑搜索算法，建立了适用于拓扑搜索的管网元件模型，为解决水电站辅机仿真的自动拓扑搜索和自动分析计算奠定了基础，该项技术已成功应用到某水电站仿真系统中。

### 1 辅机管网系统拓扑搜索算法

辅机拓扑搜索算法整体的算法流程图如图 1。包括：元件定义，节点融合，支路融合，回路组成。以水系统为例，对水系统所有管道进行搜索、合成。搜索出回路后，根据回路系数和阀门、水泵模型计算水系统所有管道的压力和流量。

#### 1.1 元件定义

##### (1) 定义基本元件及 ID

水系统主要物理设备包括：水源、排水、水泵、过滤器、冷却器、主轴密封、阀门、管道、水压表、流量表、示流器。其中管道作为连接部件，其他元件根据连接的端口数可分为单端口元件、两端口元件和三端口元件。一端口元件：水源、排水、水压表、主轴密封；二端口元件：水泵、冷却器、主轴密封、阀门，流量表，示流器；三端口元件：过滤器。

设备 ID 反映设备在图上的编号，设备号反映设备类型。

##### (2) 定义支路及回路

除单端口设备外，其他设备都看作支路，并对支路编号。

定义支路结构为（支路号，起始物理节点，终止物理节点，支路系数，支路类型）的结构体。

支路类型包括供水支路、测量支路，供水支路要反映该支路在供水回路中的位置。在第一步的拓扑扫描中，只区分水源支路、排水支路、供水支路及测量支路。支路系数反映该支路的通断状态。阀门状态由开度反映，冷却器及密封状态由故障内容反映，过滤器状态由过滤器的工作时间反映。

定义的这些数据都保存在元件的属性列表中。还有元件的一些静态参数如阀门(开度)、过滤器(设定压差、故障)、冷却器(压力、系数)、示流器(系数，由故障决定)、泵(开停状态)等都保存为元件的一种属性。

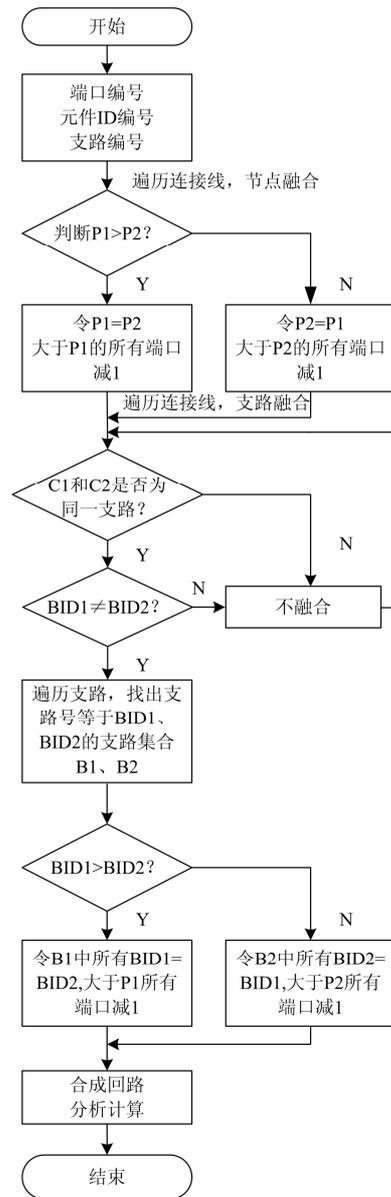
#### 1.2 管道融合

物理节点形成通过管道融合实现。由连接管道确定连接设备及端口，先进行端口号修正，再通过融合管道来实现节点融合（其融合过程见流程图）得到物理节点，保存物理端口号。

#### 1.3 支路融合

支路融合是在管道融合的基础上实现的，其具体的融合过程见图 1 拓扑算法流程图中的描述。

管道融合和支路融合后，就形成了整个网络的支路结构，即支路结构体数组。



(端口: P1、P2; 元件: C1、C2; 支路: BID1、BID2)

图 1 拓扑算法流程图

Fig. 1 Flowchart of topology algorithm

在辅机管网系统中, 存在大量的并联支路, 传统的基于关联矩阵的拓扑算法规定网络拓扑不能含有并联支路<sup>[13]</sup>, 而本文的拓扑算法能较好的处理并联支路的情况。本文是在图形化的基础上对实例化的设备进行拓扑搜索, 形成的支路结构包含了起始和终止的物理节点, 而并联支路具有相同的起始和终止物理节点, 因此支路融合对并联支路同样有效。

#### 1.4 回路合成

读入所有的元件拓扑信息, 对基本信息进行分析, 形成用于计算用的变量信息, 即支路结构。支路结构是用于水系统计算的基本单元也是进行回路合成的基本单位。

形成支路结构后, 对系统的阀门进行遍历, 如阀门开度为 0, 则去掉其所在的支路, 这样避免了后面的计算矩阵的奇异, 再根据某些回路的固有特点结合支路类型属性, 进行组合, 形成回路, 计算回路系数。

#### 1.5 分析计算

通过支路合成回路后, 最主要的就是对支路系数和回路系数的计算了, 然后对整个水系统进行分析计算, 后面的计算实例中将对此进行详细的概述。

## 2 流体计算的数学模型和动态建模

### 2.1 泵的数学模型

辅机系统的拓扑结构由阀门、泵和管道等组成。

在模型中, 泵可以认为是一个压力源。由泵产生的压力和通过泵的流量之间的关系应符合泵的特性曲线。实际计算中可以拟合成二次曲线的形式。

$$\Delta P = P_D - P_S = aQ^2 + bQ + c \quad (1)$$

式中:  $P_D$ 、 $P_S$  分别为泵的出口、入口压力 (Pa);  $Q$  为泵的流量 ( $m^3/s$ );  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为泵的特性常数, 可根据曲线拟合得到。

### 2.2 不可压缩流体管网计算模型

#### 2.2.1 流体阀门计算

电站内有大量各种不同类型的控制阀门, 如: 电动阀、气动阀、电磁阀和逆止阀等。阀门存在着中间状态, 流体阀门计算根据辅机控制系统模型中对于阀门的操作指令, 计算阀门开度和阀门流导, 一般情况下可认为流导为常数。

具有管道和阀门回路的流量、流导和阀门开度的计算公式如式(2)。

$$Q = AV_p(P_1 - P_2)^{1/2} \quad (2)$$

式中:  $Q$  为通过回路的流量;  $A$  为回路流导;  $V_p$  为

阀门开度 (0-1);  $P_1$  为系统入口压力 (Pa);  $P_2$  为系统出口压力 (Pa)。

化成二次曲线的形式为

$$\Delta P = P_1 - P_2 = aQ^2 \quad (3)$$

式中, 系数  $a = 1/(AV_p)$ 。

由于水泵的特性方程与阀门的流量方程都为非线性的, 进行泰勒展开得到线性方程<sup>[14]</sup>:

$$\Delta P = -aQ_0^2 + 2aQ_0Q + bQ + c \quad (4)$$

对于阀门来说  $b=c=0$ 。

于是建立单元压差与流量的关系式如式 (5)。

$$Q = K \cdot \Delta P + C \quad (5)$$

#### 2.2.2 流体管路开度计算

根据流体阀门流量计算公式可以推导出串并联阀门的等效开度。

(1) 并联阀门的等效开度。在有二个并联阀门的回路中, 设其阀门开度分别为  $V_{p1}$ 、 $V_{p2}$ , 设  $A=A_1=A_2$ , 则并联等效流量

$$F = A(V_{p1} + V_{p2})(P_1 - P_2)^{1/2} \quad (6)$$

可以看出并联阀门的等效开度为

$$V_p = V_{p1} + V_{p2} \quad (7)$$

(2) 串联阀门的等效开度。设其阀门开度分别为  $V_{p1}$ 、 $V_{p2}$ , 设  $A=A_1=A_2$ , 则串联等效流量

$$F = A \frac{(V_{p1} \cdot V_{p2})}{V_{p1}^2 + V_{p2}^2} (P_1 - P_2)^{1/2} \quad (8)$$

等效阀门开度为

$$V_p = \frac{(V_{p1} \cdot V_{p2})}{V_{p1}^2 + V_{p2}^2} \quad (9)$$

为便于计算取近似等效开度:

$$V_p = V_{p1} \cdot V_{p2} \quad (10)$$

#### 2.2.3 流体管路逻辑计算

根据流体管路的走向将没有分支的管路部分合并, 简化为一条管路支路, 根据该支路阀门的通断计算支路系数; 根据化简后管路结构, 合并相互连接的不同支路, 形成不同的流体回路, 并计算等效流体回路系数和流导。

(1) 并联支路的等效回路系数和等效流导计算  
并联支路的等效回路系数和等效流导均为各并联支路的支路系数和流导之和。

等效回路系数计算:

$$V_p = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (11)$$

等效流导计算:

$$A_p = A_1 + A_2 + \dots + A_n \quad (12)$$

(2) 串联支路的等效回路系数和等效流导计算  
等效回路系数计算:

$$V_p = V_1 \cdot V_2 \cdot \dots \cdot V_n \quad (13)$$

等效流导计算:

$$A_p = \frac{1}{\left(\frac{1}{A_1^2} + \frac{1}{A_2^2} + \dots + \frac{1}{A_n^2}\right)^2} \quad (14)$$

### 2.3 管网的总体方程及计算

根据前面水泵和阀门单个元件的方程, 可以得到管网( $m$ 个节点和 $n$ 个支路)的总体方程如式(15).

$$[K][X]=[B] \quad (15)$$

式中:  $[K]$  为管网的特性矩阵;  $[X]$  为未知数压力  $P$  和流量  $Q$  的矩阵;  $[B]$  为已知的常数矩阵。

再根据质量守恒定律, 流体网络中的每个节点的流量之和为 0, 即

$$\sum_{i=1}^n Q_i = 0 \quad (16)$$

式中,  $Q_i$  为第  $i$  个支路流进或流出的流量。

在辅机的水系统中, 主要的元件模型是阀门和水泵。阀门模型接受外界的操作指令。主要是对其开关过程进行建模, 模型可以反映中间动态过程, 每隔一个仿真步长将阀门的开度输出。系统计算模型接收所有阀门的开度信息, 根据前面搜索出来的拓扑结构, 合成所需的支路系数和回路系数进行计算<sup>[15]</sup>。

### 3 水电站辅机系统仿真计算

本文提出的辅机管道拓扑算法是适用于整个辅机系统的, 因为辅机水、气、油系统的基本元件是一致的。本文以水系统的计算为例, 详细叙述其求解过程。其他系统的计算类似。

#### (1) 确定供水回路

由供水支路合成供水回路, 回路包括: 主技术供水回路、备用技术供水回路、主密封水回路、备用密封水回路。

主技术供水回路包括: 主水源支路、主供水支路、技术供水支路、冷却器支路, 排水支路; 备用技术供水回路包括: 备用水源支路、备用供水支路、技术供水支路、冷却器支路, 排水支路。

主密封水回路包括: 主水源支路、主供水支路、密封水支路; 备用密封水回路包括: 备用水源支路、备用密封支路、密封水支路。

#### (2) 流量计算

计算过滤器的工作时间和支路系数以及计算各支路的支路系数。支路系数=阀门开度\*冷却器状态\*过滤器状态。

根据供水方式(主供水、备用供水), 计算回路系数。回路系数=支路系数 1\*支路系数 2\*支路系数 3

回路系数校核各冷却器支路的支路流量; 再由冷却器流量合成技术供水流量。密封水的流量计算与技术供水系统类似。

判断水源供水方式、技术供水的方式(正反向), 给示流器赋值。

#### (3) 压力计算

根据流量计算的结果, 校核供水回路各物理节点的压力。

搜索所有支路号为 0 的支路, 校核与供水支路的起止节点相连的元件水压; 对于水源支路还需从水源端进行校核。

搜索测量回路, 根据测量回路所连接的物理节点及测量回路的回路系数给压力表赋值。

以某水电站的仿真培训系统为例, 用 Visual Graph 8.0 开发的图形系统的图元如图 2。



图 2 部分辅机图元

Fig. 2 Some auxiliary primitives

用 VB 开发辅机系统拓扑搜索可视化界面(如图 3)。

图 3 的拓扑搜索实现了管道融合, 支路融合, 回路合成。最后形成了一个简化的网络如图 4(以主水源蜗壳为供水方式的网络, 备用水源的供水网络类似)。

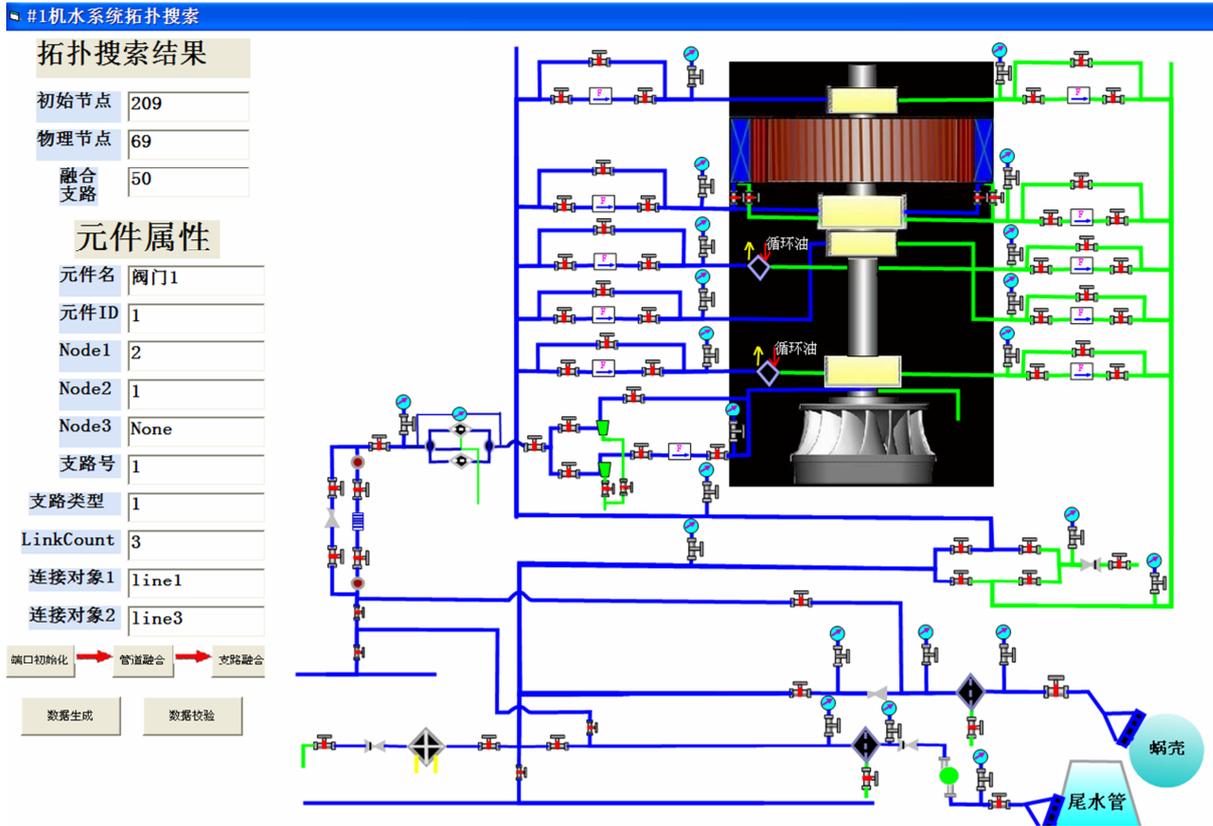


图3 拓扑搜索

Fig. 3 Topology searching

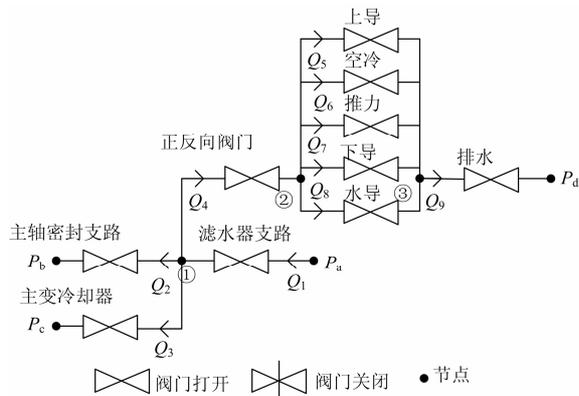


图4 简化网络图

Fig. 4 Simplified network figure

管网总体方程为

$$Q_i = K_i \Delta P_i + C_i (i = 1, 2, \dots, m) \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^n Q_i = 0 \quad (18)$$

写成矩阵的形式为

$$[K] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_4 & K_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_5 & K_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_6 & K_6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -K_7 & K_7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -K_8 & K_8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -K_9 \\ 1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[X] = [Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6, Q_7, Q_8, Q_9, P_1, P_2, P_3]^T$$

$$[B] = [C_1 + K_1 P_a, C_2 - K_2 P_b, C_3 - K_3 P_c, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9 - K_9 P_d, 0, 0, 0]^T$$

以设备的设计流量为初值, 求出  $P$  和  $Q$ , 再与原来的  $Q$  值进行比较, 误差较大, 则继续迭代, 如此类推, 直至迭代出的  $Q$  值满足要求为止。

已知某水电站的技术供水系统的蜗壳水源压力 1.29 Mpa, 排水、尾水压力 0.15 Mpa。压力计算

结果如下：总冷却水压 0.49 MPa，密封水压 0.92 Mpa。各冷却器的流量计算结果如表 1 所示。其计算值满足设备实际运行的供水要求。

表 1 计算流量

Table 1 Calculation flow

上导 L/min	空冷 L/min	推力 L/min	下导 L/min	水导 L/min	主轴 密封 L/min	主变 冷却 L/min
569	14 800	1 170	780	680	357.2	3 200

#### 4 结语

本文利用面向对象的图形化建模思想，利用 VG 提供的 Activex 接口，在 VB 中开发出可视化的图形界面。提出和实现了适用于辅机管网系统的拓扑搜索算法，并解决了拓扑算法融合不全以及支路融合等技术难点。能快速地分析出网络结构，对不通的支路进行剔除，保证最后合成的简化网络能持续计算，能有效避免“死点”，“死网”问题，实时跟踪管网结构的变化。通过对某水电站的实际仿真，验证了算法的有效性和快速性。

#### 参考文献

- [1] 林济铿, 覃岭, 罗萍萍. 基于 Visual Graph 的电力图形系统开发[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(15): 73-74.  
LIN Ji-keng, QIN Ling, LUO Ping-ping. Graph development of power system based on Visual Graph[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(15): 73-74.
- [2] SHIN J R, LEE W H, IM D H. A windows-based interactive and graphic package for the education and training of power system analysis and operation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(4): 1193-1199.
- [3] 邸凯, 常鲜戎, 刘寒. 圈定保护启动范围的变电站继电保护仿真模型的开发[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 134-139.  
DI Kai, CHANG Xian-rong, LIU Han. Substation protective relay simulation model improved by identifying area of relay pickup[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(18): 134-139.
- [4] 丁明, 徐婷婷, 毕锐, 等. 基于 STL 的配网结构自动分析功能设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 109-114.  
DING Ming, XU Ting-ting, BI Rui, et al. Design and implementation of distribution networks structure automatic analyzing function based on STL[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 109-114.
- [5] 王曼. 电力网络拓扑分析算法的研究与设计[D]. 南昌: 华东交通大学, 2012.  
WANG Man. The study and design of power network topology algorithms[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2012.
- [6] 李红江, 鲁宗相, 王淼, 等. 基于可靠性模型的船舶电网拓扑结构对比分析[J]. 电工技术学报, 2006, 21(11): 47-51.  
LI Hong-jiang, LU Zong-xiang, WANG Miao, et al. Contrasting analysis of shipboard power system topological structures based on reliability model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(11): 47-51.
- [7] 姚玉斌, 宣俭, 于娜, 等. 连通矩阵准平方法网络拓扑分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 31-34.  
YAO Yu-bin, XUAN Jian, YU Na, et al. Determination of network topology by quasi-square of the connectivity matrix[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 31-34.
- [8] 赖晓平, 周鸿兴. 电力系统网络拓扑分析的有色 Petri 网模型[J]. 电网技术, 2000, 24(12): 5-11.  
LAI Xiao-ping, ZHOU Hong-xing. Color petri model of power network topological analysis[J]. Power System Technology, 2000, 24(12): 5-11.
- [9] 张晋芳, 王增平, 张亚刚, 等. 基于虚拟阻抗的厂站内拓扑分析新方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(2): 187-193.  
ZHANG Jin-fang, WANG Zeng-ping, ZHANG Ya-gang, et al. A novel method of substation configuration based on virtual impedance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(2): 187-193.
- [10] 王增平, 张晋芳, 张亚刚. 基于主接线图形特征的厂站内拓扑分析新方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 255-260.  
WANG Zeng-ping, ZHANG Jin-fang, ZHANG Ya-gang. A novel graphic characteristic based method for topology analysis in substations and power plants[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 255-260.
- [11] 林济铿, 覃岭, 罗萍萍. 基于图形建模的电力系统拓扑分析新方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(22): 54-59.  
LIN Ji-keng, QIN Ling, LUO Ping-ping. A new method for the power system topology analysis based on graphic

- modeling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(22): 54-59.
- [12] 陈芑, 庄宝玉, 赵新华. 事故状态下供水管网的拓扑分析[J]. 中国给水排水, 2012, 28(9): 48-52.  
CHEN Peng, ZHUANG Bao-yu, ZHAO Xin-hua. Topological analysis for water distribution system under failure state[J]. China Water & Waste Water, 2012, 28(9): 48-52.
- [13] CHAN D S M, KHIM S C, LECKIE C, et al. Visualisation of power-law network topologies[C] // The 11th IEEE International Conference on Networks, Sydney, Australia, 2003.
- [14] 孟祥文, 樊红刚, 陈乃祥. 水电站辅机管网时变系统计算研究[J]. 水力发电, 2003, 29(7): 46-48.  
MENG Xiang-wen, FAN Hong-gang, CHEN Nai-xiang. Study on the calculation of time-varying system of pipe network of hydropower station[J]. Water Power, 2003, 29(7): 46-48.
- [15] CHEN Tie. General hierarchical modular structure for hydropower station auxiliary system simulation[J]. Energy Procedia, 2011.

---

收稿日期: 2013-08-12; 修回日期: 2013-10-10

作者简介:

吴喜春(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水电站仿真与控制, 电力系统运行与控制; E-mail: 357287121@qq.com

李咸善(1964-), 男, 博士, 教授、博士生导师, 主要研究方向为水电站仿真与控制, 电力系统运行与控制;

陈 铁(1975-), 男, 通讯作者, 硕士, 讲师, 主要研究方向为水电站仿真与控制, 电力系统运行与控制。