

基于实际线路结构的低压电网线损计算

王凌, 许跃进

(北京电力公司调度通讯中心, 北京 100083)

摘要: 针对现行低压台区线损计算中过多等效带来的计算误差, 介绍了一种基于实际线路结构的计算方法。该方法的核心思路在于将实际的线路参数信息与拓扑分析相结合, 划分三种已知信息的类型, 在台区首端负荷已知的条件下最大近似程度地推算实际负荷走向, 推导出全台区各支路电流的数学表达方式, 从而掌握台区各支路的有功损耗情况, 进而得到全台区的线路有功损耗。同时, 对算法的计算机实现进行了详尽的介绍, 并通过具体算例证明该算法的优势与可行性。

关键词: 线损; 低压台区; 实际线路; 分流方式; 程序设计; 算例分析

Method for calculating low voltage district line loss based on actual network structure

WANG Ling¹, XU Yue-jin²

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper introduces a method of low voltage line loss calculating which depends on the real net structure to reduce the result error. The method combines line message with topology analysis, predicts the most approximate load of each branch, thus gets the losses of branches and the whole area. Practical example has proved its superiority and feasibility.

Key words: line losses; low voltage; real net structure; software

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)19-0016-06

0 引言

随着城乡配电网的改造与农电一体化工作的全面开展, 低压电网线损管理工作的重要性日益凸现, 这其中线损的理论计算和降损分析是至关重要的两个方面。“竹节法”^[2]作为低压台区线损计算的现行传统方法, 由于采用了过多的等效处理, 计算精度上有很大欠缺; 而对于线损计算方法新的研究与尝试中^[4, 5], 又鲜有能特别针对低压台区自身特点的方法出现。新形势下的低压线损计算工作, 难点依然在于节点多、分支多、设备型号多, 网络的构成相当复杂, 而另一方面的优势则是可获得线路信息更加完备与详尽。因而, 充分利用这些新增信息, 进行更为优质的计算分析, 是势在必行的工作。

1 研究背景与改进思路

1.1 研究背景

在多次的调查研究中发现, 随着电力技术的进步与农网改造工作的开展, 对于低压台区的线路结构与参数, 我们已能掌握较为完备的信息。典型的计算机绘制的低压台区图如图1所示。

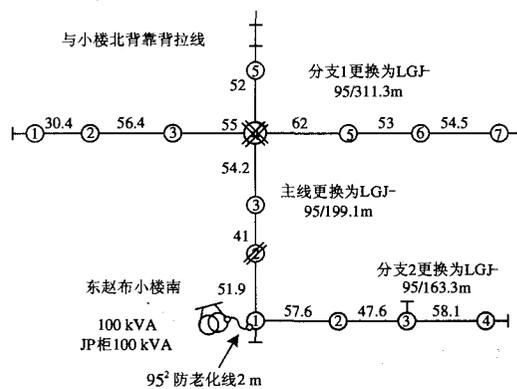


图1 实际低压台区线路图

Fig.1 Actual network of low voltage district

1.2 改进思路

传统低压台区的线损计算中, 对于线路结构方面, 大多数采用“竹节法”的等效处理。本文所述算法对“竹节法”处理方式的具体改进思路如表1所示。

由处理方式的不同, 可以总结出研究新算法的意义在于以下几方面:

(1) 从很大程度上提高计算线损率的准确程度使

计算结果有更高的参考价值;

(2)对各支路损失有针对性的估算, 有利于局部线损信息的掌握;

(3)分析支路损失占全部损失百分比, 为降损节能措施的制定提供参考。

另一方面, 由表 1 中所述, 可以形成“基于实际线路结构低压线损计算方法”的基本思路:

(1)确定分流依据: 在首端负荷及电流已知的条件下, 确定哪些量可以作为分配负荷走向的依据;

(2)确定电流分配的数学表达: 在上一点确定的基础上, 将线路结构用数学形式表达, 并推导出分流公式, 从而进一步得到各支路电流值与有功损耗值;

(3)计算机算法的实现: 开发计算机软件实现算法, 从而便于用户操作。

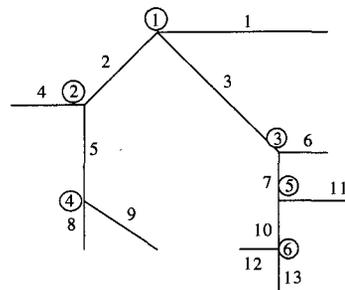


图 2 某低压台区线路结构抽象图

Fig.2 An abstract circuit structure of a low voltage district somewhere

以下将以图 2 所示低压台区电网结构及其他附加信息为例, 分节介绍各具体步骤。

表 1 两种线损计算方式对比

Tab.1 Comparison between the two kinds of loss calculation method

方法名称	竹节法	基于实际线路结构的计算方法
计算过程差异	认为同型号的接户线长度相等, 同型号的支路长度相等;	计算所用线路采用实际长度;
	认为接户线在支线上均匀分布, 支线在主干线上均匀分布;	线路的分布情况依据实际电路结构;
	认为每条支线下的接户线数目相同	在尽可能的情况下, 依据真实数目计算;
	认为每条接户线下负荷相同, 每条支线下负荷相同, 主干线及支线电流“竹节式”递减;	统计实际负荷, 或根据线路结构分配负荷;
结果分析差异	接户线损失为单线损失平均值乘以接户线数, 支线损失为单线损失平均值乘以支线数, 以此类推;	确定首端电流曲线, 按照线路分布制定分配电流规则, 计算各支路电流值, 计算各支路有功损耗;
	计算结果宏观反映整个台区的线损情况;	计算结果可以详细反映每条支路的线损情况, 反映每部分主干线的线损情况;
相同处理	认为上级节点与下级节点的电压相等, 负荷曲线形状相同, 功率因数相同(三相不平衡度相同)。	

2 分流依据的确定

根据 $\Delta A = I^2 R t$ 计算各支路的有功损耗值, 在线路参数和时间已知的条件下, 确定流经每条支路的电流即为解决问题的关键。设台区变压器出口处(即首端电源处)的电流变化曲线已知, 本章要解决的问题在于: 找出可以表征负荷流向的参数类型, 将这些参数作为分配电流走向的依据, 并统称为“分流参数”。

2.1 将各支路的月用电量和作为分流参数

确定依据: 由 $A = Pt = UIt$, 且各节点电压同一时刻视为相同推断, 在相同时间内, 负荷消耗电量大的支路, 单位时间内流经的电流值也大。

分流参数: A_i 为第 i 条支路下用户月用电量总和。

准确程度: 由于电量与电流的这种直接关系, 与其他参数相比分流准确度最高。

实现难度: 由于需要统计各支路下全部用户的月用电量, 工作量与难度较大。

研究意义: 精确度高, 可作为其他方式的评价依据, 并可视为将来自动化抄表技术普及后的工作所做的前瞻性研究。

2.2 综合各支路下的表计数目与支路长度来确定分流参数

确定依据: 低压台区的设备配置方式为一户一表, 表计数目可以侧面反映支路的用电量; 同时, 支路长度也是用电量的一个隐性影响因素, 将两者结合考虑, 可以达到尽量准确的分流效果。

概念定义: 设每条支路的表计数目为 $E_i (i=1, 2, \dots, n)$, 支路长度为 $l_i (i=1, 2, \dots, n)$, n 为支路总数目, 定义

“支路表计密度”为每条支路单位长度上分布的表计数目

$$\rho_i = E_i / l_i (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

“支路表计密度系数”——每一条支路“表计密度”占全台区所有支路“表计密度”和的百分比

$$K_{\rho_i} = \rho_i / \sum_{j=1}^n \rho_j (j=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

“支路等效长度”——支路实际长度与“支路表计密度系数”的乘积

$$L_i = K_{\rho_i} l_i (i=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

最后得到的这个“支路等效长度 L_i ”即是一个结合了表数和长度两种信息的综合参数，与 2.1 中的 A_i 一样，将其作为一种分流参数来讨论。

准确程度：虽不及 A_i ，但由于低压台区每户用电量差别不很大，又结合了线路长度因素，分流准确度较好。

实现难度：较 2.1 中方法容易，一部分台区接线图上已标明表计数目信息与线路长度信息，另一部分可能需要单独统计表计数目。

适用情况：当台区线路图信息完整，且电量信息统计困难，或精度要求适合的情况下。

扩展讨论：与表计数目的作用类似，当一条支路下“所有接户线的数目”已知，可以代替 E_i 使用。但由于接户线信息在线路图上一般没有体现，使用时候需要附加调查，与上面的应用过程类似，本文对这种分流参数不再做详细讨论。

2.3 综合各支路下的杆塔数目与支路长度来确定分流参数

确定依据：线路杆塔的作用，一是保证线路的连接与传递，二是作为接户线分配的出发点。因此，一条支路所包含的杆塔数目，也可以从一定程度上显示该支路的用电量，但具体应用中同样要结合线路长度考虑。

概念定义：设每条支路的表计数目为 $P_i (i=1, 2, \dots, n)$ ，支路长度为 $l_i (i=1, 2, \dots, n)$ ， n 为支路总数目，定义

“支路杆塔密度”——每条支路单位长度上分布的杆塔数目

$$\rho'_i = P_i / l_i (i=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

“支路杆塔密度系数”——每一条支路“杆塔密度”占全台区所有支路“杆塔密度”和的百分比

$$K'_{\rho_i} = \rho'_i / \sum_{j=1}^n \rho'_j (j=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

“支路等效长度”——支路实际长度与“支路杆塔密度系数”的乘积

$$L'_i = K'_{\rho_i} l_i (i=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

最后得到的这个“支路等效长度 L'_i ”即是一个结合了杆塔数和长度两种信息的综合参数，它与 A_i 、 L_i 一样，可作为一种支路分流参数。

准确程度：较前几种准确度较差，但相对于“竹节法”，还是有它的优势。

实现难度：易于实现，所需原始参数在目前的接线图上都有体现。

适用情况：较少数据基础支持，且精度要求允许的情况。

以上详细介绍的三种分流参数，综合分析的结论是：由 2.1 至 2.3 分流精度递减、操作简易程度递增，各种方式都有其特点及适用范围。

3 电流分配的数学表达式

3.1 节点与支路的编号规则

要进行支路结构的分析，无论是手算还是计算机实现，确定节点与支路的编号规则是重要的起点，通过参考现有的拓扑分析方法，再结合低压台区的实际状况，本文提出了“低压台区分层编号规则”，适用于辐射形、开环运行的低压农网。

对于图 2 中线路，用编号①~⑥代表全部节点，编号 1~13 代表全部支路。

节点所遵循的编号原则为：

(1)所有的末端节点编号为 0 或空—null (易于计算机识别的特殊考虑)；

(2)电源点为首节点，也称为一级节点，编号为①；

(3)直接与电源通过一条导线相连的节点为二级节点，由②开始依次编号全部二级节点，如图中所示②、③号节点；

(4)以此类推，三级节点、四级节点……，直至将所有末端支路的首节点编号完毕，本例中，④、⑤为三级节点，⑥为四级节点。

支路所遵循的编号原则为：

(1)在节点编号完整的基础上，以一级节点为首节点的支路为一级支路，从 1 开始，对其依次编号，如图中的 1、2、3 号支路；

(2)以二级节点为首节点的支路为二级支路，如图中的 4~7 号支路，同时也要遵循小号节点下支路先编号，大号节点下支路后编号的原则；

(3)以此类推，三级支路、四级支路……，直至所有末端支路编号完毕。

依据以上原则编号线路结构清晰，不只反映出了节点支路的关联关系，同时也可体现线路间的级别关系，整个台区的始端信息和末端信息都有体现，适用于之后的算法分析。

3.2 确定各支路电流值的数学表达式

通过第2章的分析, 已确定三种分流参数 A_i 、 L_i 和 L'_i 来表征每条支路所带负荷大小, 为便于下面的讨论, 将它们统一用 $m_i (i=1, 2, \dots, n)$ 来表示。

结合图2分析电流传递的过程: 起始电流由一级节点①注入后, 分别流入一级支路1、2、3, 电流分配的依据是该支路及其后续所有支路所带负荷量之和。如: 分配给支路2的电流由支路2、4、5、8、9 负荷之和决定, 流经支路3的电流则是由支路3、6、7、10、11、12、13 负荷之和决定。当电流通过二级节点②、③向二级支路分配时, 遵循同样的原则, 以此类推。

在这里定义概念“支路分流决定因子”——某条支路本身以及所有影响该支路电流分配的后续(包括支系与隔代)支路的分流参数之和。数学表达式:

$$M_i = m_i + \sum_{i < j \leq n} m_j (i=1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

其中: j 为所有影响支路 i 电流分配的后续支路编号; n 为支路总数。

当电流每次在节点处面临分配时, 即按照其下级支路各自的“分流决定因子”的比例关系分配。仍以1、2、3支路为例, 设起始电流为 I_0 , 各支路电流大小为 $I_i (i=1, 2, \dots, n)$, 则

$$I_1 = I_0 \times M_1 / (M_1 + M_2 + M_3),$$

$$I_2 = I_0 \times M_2 / (M_1 + M_2 + M_3),$$

$I_3 = I_0 \times M_3 / (M_1 + M_2 + M_3)$; 同理, 电流 I_2 在节点②处向下分流时, $I_4 = I_2 \times M_4 / (M_4 + M_5)$, $I_5 = I_2 \times M_5 / (M_4 + M_5)$ 。

由此引出每条支路电流值的表达式:

对于所有一级支路(即以电源点为首节点的支路)

$$I_i = I_0 M_i / \sum_{1 \leq j \leq n} M_j (i=1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

式中: i 为某条一级支路编号; j 为全部一级支路编号。

一级以下级别的其他支路

$$I_i = I_k M_i / \sum_{1 \leq j \leq n} M_j = \quad (9)$$

$$I_k M_i / (M_i - m_i) (i=1, 2, \dots, n)$$

式中: i 为某条支路编号; k 为 i 的直系上级支路编号; j 为与支路 i 分配 I_k 的所有支路号。

将 m_i 的意义分别扩展回 A_i 、 L_i 和 L'_i 后, 即是在三种分流依据下各自的支路电流值表达式。

至此, 已得到各支路电流值的数学表达式, 根据该表达式并结合起始电流值, 可以得到整个台区每条支路在一定时刻内的电流大小, 解决了线损计算过程中关键问题。

4 计算机算法的实现

4.1 关联矩阵的形成

要分析线路关系, 首先要求用户按照一定的格式将线路关系输入到电脑中, 本文所规定格式为: 支路编号、首节点号、末节点号、该支路分流参数。

其次则是用关联矩阵来用数学的方式表达拓扑关系。

在本文中, 将支路的方向就定为支路中电流的方向, 针对图2中的线路, 依据3.1中的编号规则, 形成关联矩阵如下所示:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	-1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	-1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	-1	0	0	1	1	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	1	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	1	1

矩阵中列编号1至6代表节点, 行编号1至13代表支路。矩阵内元素1代表相应节点为支路的首节点; 元素-1代表相应节点为支路的末节点; 元素0代表相应节点与支路无关联关系。

4.2 由下至上扫描, 确定“支路分流决定因子”

由第3章中的讨论可知, 在分流参数和线路关联关系已知的情况下, 获得“支路分流因子”是解决问题的关键, 计算机程序中, 分两步采用两种类型扫描来得到该变量值。

第一步: 针对所有末端支路

分别对各支路(即各列)进行扫描, 找出所有不包含-1元素的列。对于关联矩阵中的每一列, 元素-1对应的行即为该支路的末端节点编号, 当一列中不包含-1元素, 则说明0是该支路的末节点, 则该支路为末端支路。末端支路的“分流决定因子”等于“分流参数”值, 即 $M_i = m_i$, 其中 i 为所有末端支路编号, 在本例中, 支路1、4、6、8、9、11、12、13都属于末端支路, 且都遵循此种处理方式。

第二步: 针对末端以外的其他支路

对于除末端以外的其他支路, “分流决定因子”是本支路及其所有下级支路的“分流参数”之和。处理方式: 从大到小扫描全部支路编号, 即分别扫描所有列, 针对每一条支路首先找出它的唯一末节点(关联矩阵的这一列中-1所对应的行), 针对

这个节点找出它的所有直系下级支路（关联矩阵的这一行中 1 所对应的列），最后将本支路的“分流参数”与它所有支系下级支路的“分流决定因子”相加，即得到该支路的“分流决定因子”。

以图 2 中的支路 7 为例，扫描到关联矩阵第 7 列时，-1 元素对应第 5 行，则节点⑤是支路 7 的末节点；而对于第 5 行，两个元素 1 分别对应第 10、11 列，即可确定，支路 10、11 是支路 7 的直系下级支路，根据上面的分析得到 $M_7 = m_7 + (M_{10} +$

$M_{11})$ ，由于开始对所有支路的扫描即是从大到小进行的，此时已知 $M_{10} = m_{10} + m_{12} + m_{13}$ ，展开后，支路 7 的“分流决定因子”表示为 $M_7 = m_7 + ((m_{10} + m_{12} + m_{13}) + m_{11})$ ，完全符合该参数的定义。

4.3 由上至下扫描，确定支路电流

在所有前提条件都具备的条件下，即可完成各支路电流值的确定，支路电流的获得方式也划分为两种。

第一步：针对所有一级支路

扫描关联矩阵中的第 1 行，这一行中，元素 1 对应的列所代表的就是该台区的一级支路。而后即可根据公式 (8)，确定这几条支路的电流值。

第二步：针对一级以下级别的其他支路

对所有支路编号从小到大扫描，针对每一条支路先找到它的首节点（关联矩阵的这一列中 1 所对应的行），针对这个节点找到它的直系上级支路（关联矩阵的这一行中 -1 所对应的列），这条支路的电流即是待分配电流，则已开始扫描到的这条下级支路电流即可根据公式 (9) 求出。

以求支路 4 的电流为例，扫描到第 4 列时，元素 1 对应第 2 行，即节点②是支路 4 的首节点；而对应第 2 行，元素 -1 对应第 2 列，说明支路 2 是支路 4 的上级支路，根据公式得到 $I_4 = I_2 M_4 / (M_4 + M_5) = I_2 M_4 / (M_2 - m_2)$ ，由于开始对所有支路的扫描是从小到大进行的，此时 I_2 值是已知的，也就由此得到了 I_4 的值。

至此，算法的计算机实现介绍完毕，每条支路的电流值已由相应的存储空间所记录。

5 算例分析

本章将以图 1 中的实际网络及图 3 中的抽象网络所表示的台区为例，做较小规模算例分析。意在说明实际网络中的电流、负荷的分布是可以由上面的算法推算出来的，而“竹节法”的等效处理，正是忽略了这些差别，同时给计算结果也带来了误差。

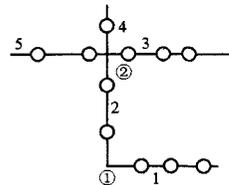


图 3 “图 1” 低压台区线路结构抽象图

Fig.3 Abstract circuit structure of the low voltage district in Fig.1

通过调研工作，可以得到的图 1 台区的基本数据如表 2 所示。

表 2 “图 1” 台区基本调研数据

Tab.2 Basic survey date of the district in Fig.1

支路号	该支路下用户月用电量和/kW·h	支路长度 /km	该支路下表计数目	该支路下杆塔数目
1	10174.2	0.1633	89	3
2	26757.5	0.1461	78	2
3	11312.7	0.1695	121	3
4	2001.6	0.052	23	1
5	6140.1	0.1418	63	2

在已知条件的基础上，结合以上算法，分别计算出各条支路所分配电流占总起始电流的百分比，结果如表 3 所示。

表 3 分别应用三种分流依据的计算结果

Tab.3 Calculation results respective based on three current distribution modes respectively

支路号	分流依据			支路电流占总电流比重
	全月用电量	表计数目+线路长度	杆塔数目+线路长度	
1	0.180	0.238	0.273	
2	0.819	0.762	0.737	
3	0.477	0.445	0.364	
4	0.084	0.085	0.121	
5	0.259	0.232	0.242	

从表中可以看出，各支路电流所占比重还是有相当大差异的，如支路 3、4、5 属于同一级别，在“竹节法”处理中电流平均分配则会造成较大的误差。

6 结论

本文针对现阶段低压农网信息较为充分，但线损计算方法相对落后的现状，提出了一种基于实际线路结构的计算方法。算法依据实际线路划分了三种电流分配依据，并提出了求取各支路电流的数学表达式，描述了计算机程序的具体实现过程。通过最后的算例分析，证实方法切实可行且具有重要的优势与研究价值。

参考文献

- [1] 翟世隆.线损知识问答[M].北京:水利电力出版社,1990.
ZHAI Shi-long. Catechism of Knowledge about Line Loss[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1990.
- [2] 侯其锋,许跃进,等.低压线损计算的“改进竹节法”[J].农村电气化,2005,(4):30-31.
HOU Qi-feng, XU Yue-jin, et al. The Improving on Calculating Line Loss of Low Voltage Distracton[J]. Rural Electrification,2005,(4):30-31.
- [3] 丁心海,罗毅芳,刘巍,等.改进配电网线损计算方法的几点建议[J].电力系统自动化,2001,25(7):57-60.
DING Xin-hai, LUO Yi-fang, LIU Wei, et al. Proposals on Improving the Current Methods for Calculating Line Losses of Distribution Network[J].Automation of Electric Power Systems,2001,25(7):57-60.
- [4] 王成山,刘姝,林勇.基于区间算法的配电网线损理论计算[J].电力系统自动化,2002,2(1):22-27.
WANG Cheng-shan, LIU Shu, LIN Yong. Electric Network Loss Calculation Using Interval Iteration Method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002,2(1):22-27.
- [5] 董继征,陈洪云,何怡刚.基于负荷分类的台区线损测算方法[J].现代电力,2006,23(1):44-48.
DONG Ji-zheng, CHEN Hong-yun, HE Yi-gang. Method for Calculating Transformer District Line Loss Based on Load Classification[J]. Modern Electric Power, 2006,23(1):44-48.
- [6] 徐凌燕.网络结构变化对线损的影响[J].华北电力技术,2005,增刊:79-82.
XU Ling-yan. Influence on Line Loss Affected by Network Structure Changes[J].North China Electric Power,2005,(S):79-82.

收稿日期:2007-04-16; 修回日期:2007-05-17

作者简介:

王凌(1982-),女,硕士研究生,主要研究方向为电力网线损计算;E-mail:wangling_0819@yahoo.com.cn
许跃进(1958-),男,教授,主要研究方向为电力系统规划。

(上接第15页 continued from page 15)

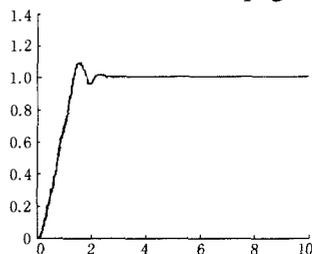


图7 常规PID励磁控制器阶跃响应仿真曲线

Fig.7 Step response of routine PID excitation controller

4 结束语

本文把传统PID和模糊控制相结合组成了模糊PID励磁控制器,从仿真结果看,具有较好的控制性能,既达到了较快的响应速度,又抑制了超调量,达到了优化PID控制器和模糊控制器的目的,为励磁控制器的设计提供了一种新的思路。

参考文献

- [1] 张代峰.数字式励磁控制系统的研究与实现[D].长沙:湖南大学,2004.
ZHANG Dai-feng. Research and Realization of Digital Excited Control System[D]. Changsha: Hunan University, 2004.
- [2] 刘金琨.先进PID控制MATLAB仿真[M].北京:电子工业出版社,2006.
LIU Jin-kun. The Simulation of Advanced PID Controller Based on Matlab[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2006.
- [3] 张立峰,金秀章,等.基于模糊自调整PID技术的励磁控制器研究[J].华北电力大学学报,2006,33(4):20-22.
ZHANG Li-feng, JIN Xiu-zhang et al. Study on Excitation Controller Based on Fuzzy Self-tuning PID Technique[J]. Journal of North China Electric Power University, 2006,33(4): 20-22.

收稿日期:2007-05-08; 修回日期:2007-06-07

作者简介:

金岫(1983-),女,硕士研究生,主要从事船舶电力推进系统方面的研究;E-mail:susan19830225@sohu.com
邓志良(1962-),男,博士研究生,教授,主要从事智能控制方面的研究;
张鸿鸣(1983-),女,硕士研究生,主要从事电力系统方面的研究。