国内外常用短路电流计算标准和方法的比较研究

王 寓[1]，王主丁[1,2]，张宗益[1,2]，樊亚辉[3]，黄丽[4]

（1.输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室（重庆大学），重庆 400044；
2.重庆大学电力能源技术经济研究院，重庆 400044；3.云南电网公司普洱供电局，云南 普洱 665000；
4.绵阳电业局电力调度中心， 四川 绵阳 621000）

摘要：简要介绍运算曲线法、IEC 标准和 ANSI 标准的短路电流计算方法，并在概念、算法以及初始条件设置等方面比较了三种计算方法的区别。通过算例，绘制不同计算电抗下三种计算方法的短路电流曲线，比较曲线间差异，分析了算法和初始条件设置等方面对计算结果的影响，找出各标准计算结果差异的规律性，为短路电流计算标准的选择提出参考性意见。

关键词：短路电流；运算曲线法；IEC 标准；ANSI 标准；差异曲线

Comparison and research on the commonly used standards and methods of short-circuit current calculation

WANG Yu[1]，WANG Zhu-ding[1,2]，ZHANG Zong-yi[1,2]，FAN Ya-hui[3]，HUANG Li[4]

（1.State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,（Chongqing University），Chongqing 400044, China； 2. Electric Energy Technology and Economy Institute，Chongqing 400044，China； 3. Puer Power Supply Bureau，Puer 665000，China； 4. Dispatching Center of Mianyang Electric Power Bureau, Mianyang 621000, China）

Abstract：In this paper，the commonly used standards or methods for short-circuit current calculation are discussed in detail, including Operational Curves，IEC Standard and ANSI Standard. And then，the difference between IEC Standard，ANSI Standard，and Operational Curves are compared regarding concepts，algorithms，initial conditions，etc. Finally，using an example，the causes of the result differences are found out by drawing short-circuit current curves of the three methods with different calculation reactance and some suggestions for the choice of short-circuit current standards are made.

Key words：short-circuit current；operational curves；IEC standard；ANSI standard；difference curve

中图分类号： TM744 文献标识码：B 文章编号： 1674-3415(2010)20-0148-05

0 引言

电力系统短路电流的计算是电力系统设计和运行中的重要环节。利用网络元件的电磁暂态模型进行短路电流计算，结果准确，但方法复杂且计算量大，不能满足工程的需求。人们投入很多精力进行短路电流计算方法的研究，以找到一个在计算的准确性和简化性上的最佳平衡点。当前短路电流的计算标准或方法主要有运算曲线法[1]、IEC 标准[2]和 ANSI 标准[3]，但对于如何根据实际的电力系统选择短路电流计算方法一直困扰电力部门。目前，国内在运算曲线法与 IEC 标准的概念和算法的比较上作了一些的研究[4]，而国外主要对 IEC 标准和 ANSI 标准进行研究比较[5-6]。因此综合分析三者在概念、算法以及结果的差异可以给选择短路电流计算标准给予一定的参考，具有实际指导意义。

本文首先简要介绍运算曲线法以及 IEC 标准、ANSI 标准三种方法的计算方法。然后从概念和算法上比较标准间的不同。通过算例计算，找出各标准在数据差异上的规律性，分析产生差异原因，对如何选择短路电流计算标准提出了建议。

1 短路电流计算标准或方法介绍

1.1 运算曲线法

运算曲线法是我国普遍采用的一种短路电流计算方法，针对我国的电机参数有较强的实用性。

应用运算曲线计算电力系统短路电流时，用各台发电机的 x''_{d} 作为其等值电抗，不计网络中负荷，作出等值网络后进行网络化简，可得到只含有发电机电动势节点和短路点的简化网络，求得各电源对短路点间的转移阻抗。等值网络中所有阻抗是按统一的功率基准值归算的，应将各电源与短路点间的

基金项目：科学技术部科技型企业技术创新基金资助项目（06c26225110507）

转移阻抗分别归算到各电源的额定容量，得到各电源的计算电抗，利用计算电抗查运算曲线求得各电源到短路点的某时刻的短路电流标幺值。短路点的总电流则为各电源对短路点的短路电流标幺值换算得到的有名值之和。

1.2 IEC 标准

在 IEC 标准中，所有旋转电机（发电机、同步电动机、异步电动机等均与发电机一样看待），电力系统电源，短路时可瞬时逆变运行的静止换流器装置等均作为电源处理，即均作为网络元件处理，但对稳态短路电流，则同步电动机、异步电动机及静止换流器无影响，即不作为网络元件。

在网络元件的阻抗方面，IEC 标准对电力系统电源、异步电动机、短路时可瞬时逆变运行的静止换流器装置、发电机等元件的阻抗有着明确的规定。所有网络元件一般均用电阻 R 及电抗 X 参数。网络中只有一个等效电压源 $CU_{\mathrm{n}}/\sqrt{3}$ 加到短路点，在短路点处标称电压 U_{n} 前加了一个系数 C，它是考虑到电压的变化，不计设备与线路电容、旋转电机的次暂态特性变化等因素。在 IEC 标准中，短路电流的计算还分为发电机近端短路和发电机远端短路两种情况。

1.3 ANSI 标准

ANSI短路电流计算标准，主要是为基于全电流整定的断路器提供短路电流参考值。ANSI 标准通过一个等效电压源 E 与一个等值阻抗串联（均取标幺值）的等值网络，来简化短路电流的计算。电压值 E 是短路母线上的标称电压，它反映了短路前的电压。ANSI 标准对系统各元件等值电抗的取值有着详细的规定[3]，ANSI 标准的短路电流计算步骤方法比较简明，即：

$$I = K \cdot \frac{E}{X} \qquad (1)$$

式中，K 由系统中的短路点和从短路点看进去的系统的 X/R 值决定。

2　三种短路电流计算标准或方法间的比较

在近、远端短路，故障前电压、元件阻抗、网路结构区分、变压器模型等概念方面以及短路电流计算方法上综合比较三种短路电流计算标准或方法间的差异，详见表 1。

表 1 短路电流计算标准的比较

Tab.1 Comparison among three short-circuit current calculation methods

比较内容	运算曲线法	IEC 标准	ANSI 标准
电机相对短路点远近的规定　发电机	计算电抗 $x_{\mathrm{js}} \geqslant 3.45$ 为远端短路	$I''_{\mathrm{kG}} / I''_{\mathrm{rG}} \leq 2$ 为远端短路；$I''_{\mathrm{kG}} / I''_{\mathrm{rG}} > 2$ 为近端短路	发电机与短路点间有两个以上（包括两个）的变压器或变压器与短路点间的转移电抗大于变压器次暂态电抗的 1.5 倍为远端短路
电动机	无明确规定	电动机供给的短路电流超出无电动机时的总短路电流的 5%为近端短路	无明确规定
故障前电压	一般选取标幺值 1.0	等效电压源 $CU_{\mathrm{n}}/\sqrt{3}$ （C 为电压系数）	等效电压源 E 一般选为标幺值 1.0
元件阻抗	忽略电阻，取其次暂态电抗	所有网络元件一般均用电阻 R 及电抗 X 参数表示	利用极限频率法求取短路点的综合电抗 X 和综合电阻 R，计算短路电流时，忽略 R
网络结构的区分	水轮机和汽轮机	辐射型网络和环状网络	无明确规定
变压器模型	无明确规定	主副线圈的额定电压与系统的电压水平不相吻合的变压器	无明确规定
短路电流的计算	$x_{\mathrm{js}} \rightarrow I_{z^*} \rightarrow I_{\mathrm{z}}$	$I''_{\mathrm{K}} = \dfrac{CU_{\mathrm{n}}}{\sqrt{3}\sqrt{R_{\mathrm{K}}^2 + X_{\mathrm{K}}^2}} = \dfrac{CU_{\mathrm{n}}}{\sqrt{3}Z_{\mathrm{K}}}$	$K \cdot \dfrac{E}{X}$ （K 由 X/R 比值决定）

下面通过对图 1 简单电力系统的短路电流计算来分析三种方法计算结果差异的规律性。系统元件参数见表 2。

通过改变线路等值阻抗计算发电机与短路点间的不同的计算电抗下的短路电流。计算结果如表 3，结果差异图如图 2~图 5。对于此系统，由差异图可以看出当发电机与短路点间的计算阻抗较小和较大时，三种标准计算的短路电流值差异很小。由图 2~图 5 可以看出，当计算电抗在 0.2～0.8 之间时，运算曲线法和 IEC 标准对短路电流初始值的计算结果存在明显的差异，计算电抗在 0.4～1.6 之间时，两种方法的对短路 0.05 后短路电流周期分量的计算结

表 2 元件参数

Tab.2 Component parameters

系统元件	元件参数
母线	$U_{\mathrm{n}} = 10$ kV
等值阻抗	$R/X = 1/10$
发电机	$U_{\mathrm{n}} = 10$ kV，$S_{\mathrm{n}} = 100$ MVA，$\eta = 0.85$，$x''_{\mathrm{d}} = 0.2$

果也有一定的差异。同时可以看出不管发电机是水轮机还是汽轮机，IEC 标准计算的短路电流值偏大，ANSI 标准的计算结果偏小。

表 3 短路电流周期分量(0 s,0.05 s)

Tab.3 Symmetrical short-circuit current (0 s, 0.05 s) kA

等值阻抗（标幺值）	计算电抗（标幺值）	短路电流周期分量/kA											
		水轮机						汽轮机					
		运算曲线法		IEC 标准		ANSI 标准		运算曲线法		IEC 标准		ANSI 标准	
		0 s	0.05 s	0 s	0.05 s	0 s	0.05 s	0 s	0.05 s	0 s	0.05 s	0 s	0.05 s
0	0.2	31.90	25.83	31.87	25.63	28.87	25.59	31.36	24.81	31.87	25.63	28.87	25.59
0.2	0.4	12.58	14.46	15.87	14.78	14.43	14.43	15.36	13.68	15.87	14.78	14.43	14.43
0.6	0.8	7.69	7.39	7.92	7.91	7.22	7.22	7.49	7.04	7.92	7.91	7.22	7.22
1.0	1.2	5.06	4.96	5.28	5.27	4.81	4.81	4.95	4.71	5.28	5.27	4.81	4.81
1.4	1.6	3.77	3.37	3.95	3.95	3.61	3.61	3.69	3.54	3.95	3.95	3.61	3.61
1.8	2.0	3.00	2.99	3.16	3.16	2.89	2.89	2.94	2.83	3.16	3.16	2.89	2.89
2.2	2.4	2.50	2.49	2.64	2.63	2.41	2.41	2.45	2.36	2.64	2.63	2.41	2.41
2.6	2.8	2.13	2.13	2.26	2.26	2.06	2.06	2.09	2.02	2.26	2.26	2.06	2.06
3.0	3.2	1.86	1.85	1.98	1.98	1.80	1.80	1.82	1.78	1.98	1.98	1.80	1.80
3.3	3.5	1.72	1.72	1.81	1.81	1.65	1.65	1.72	1.72	1.81	1.81	1.65	1.65

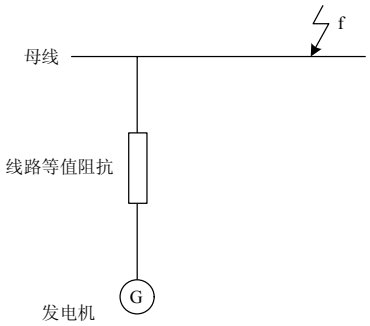


图 1 简单电力系统

Fig.1 A simple power system

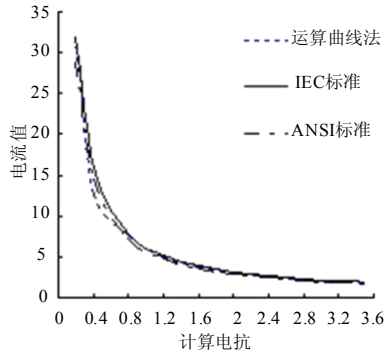


图 2 短路电流周期分量初始值（水轮机）

Fig.2 Initial symmetrical short-circuit current（hydraulic turbine）

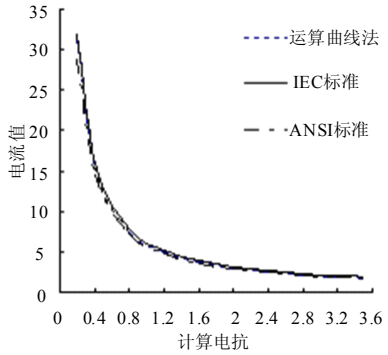


图 3 短路电流周期分量初始值（汽轮机）

Fig.3 Initial symmetrical short-circuit current（steam turbine）

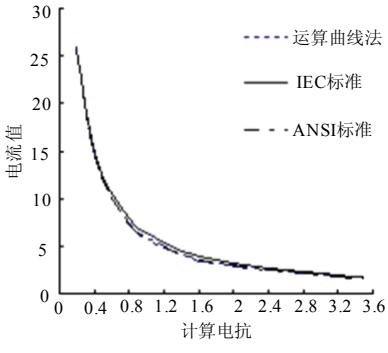


图 4 0.05 s 短路电流周期分量（水轮机）

Fig.4 0.05 s symmetrical short-circuit current（hydraulic turbine）

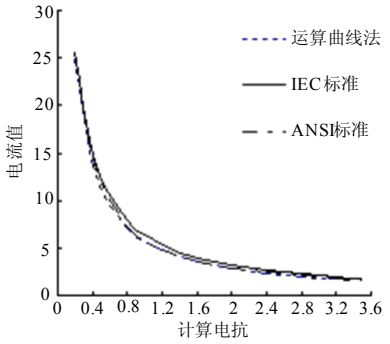


图 5 0.05 s 短路电流周期分量（汽轮机）

Fig.5　0.05s symmetrical short-circuit current（steam turbine）

对于水轮机和汽轮机两种发电机，比较不同计电抗下三种方法的短路电流计算结果，差异分析有较强的普遍性和指导性。在计算电抗很小的情况下，三种结果差异较小，对于发电机的近端短路（x_{js}≤0.2）可用简单方便的运算曲线法进行计算。当 0.2＜x_{js}＜1.6 时，运算曲线法和 IEC 标准计算结果差异较大，如 x_{js}=0.4 时，水轮机短路电流周期分量初始值的计算结果两者的差异达到 20.7%。此类情况下建议采用对短路过程描述较为详细的 IEC 标准进行计算。同时还要根据电机的参数、电网类型，慎重选择计算标准。当 x_{js}＞1.6 时，特别是在发电机远端短路时，可采用运算曲线法计算短路电流。

运算曲线法的制定能给我们一些启示：可运用统计手段，统计不同转移阻抗下三种方法计算结果的差异，得到更为精确更具代表性的短路电流差异曲线。对各标准适用的计算电抗区间可作出更为准确的划分。

3　算例

某电力设计院 2005 年 1 月《某水电站（4×260 MW）新建工程接入系统设计》报告所提供的系统资料，525 kV 母线的系统阻抗值：正序为 0.007 pu，零序阻抗为 0.013 pu。元件参数见表 4，短路电流计算系统示意图见图 6，运用运算曲线法、IEC 标准和 ANSI 标准计算 d-1，d-2 和 d-3 处的短路电流，结果见表 5。

从表 5 三相短路电流的比较中可以看出，IEC 标准在短路点 d-1 处对发电机 1～4F 以及 d-2 处对发电机 1F 短路电流的计算都要比运用运算曲线法的计算结果偏大，在短路点 d-1 处对系统 S 以及 d-2 处对系统 S 和 2～4F 短路电流的计算要偏小，在 d-1，d-2，d-3 处计算的总短路电流比运算曲线法计算结果都要大，最大偏差达到 5.85%。ANSI 标准在三处短路点处求得的短路电流都要比运算曲线法的计算结果偏小。

计算结果的差异是由于各种标准考虑的重点不同，中间的计算途径不同所造成。结果的差异性使得不同的标准或方法有着相应的适用范围。选择短路电流计算标准要结合工程的要求、各标准的适用范围和网络的实际情况。例如 ANSI 标准计算短路电流的过程比较简单，计算结果相对其他两种标准的计算结果相对较小，但它的目的主要是选择断路器，对于不同开断周期的断路器，相应的短路电流有着一定的修正系数，通过实践证明，这种方法是可行的。

表 4　元件参数

Tab.4　Component parameters

系统元件	元件参数
等值电网 S	$U = 525$ kV
	$z_{(1)} = z_{(2)} = 0.000955 + \mathrm{j}0.007641$
	$z_{(0)} = 0.001788 + \mathrm{j}0.0143$
	$S_B = 100$ MVA, $U_B = 500$ kV
发电机（1F-4F）	$U_n = 15.75$ kV
	$S_n = 288.9$ MVA, $\eta = 0.9$
	$x_d'' = 0.22$
	$x_{(1)} = x_{(2)} = 0.19$ Ω
变压器（1B-4B）	500 kV/15.75 kV, 300 MVA
	$Z\% = 14.00$
	$x_{(1)} = x_{(2)} = x_{(0)} = 0.115\ 7$ Ω（归算到低压侧）
变压器 5B	15.75 kV/10 kV, 2 400 kVA
	$Z\% = 6.00$
d-1 处母线	$U = 500$ kV
d-2 处母线	$U = 15.75$ kV
d-3 处母线	$U = 10$ kV

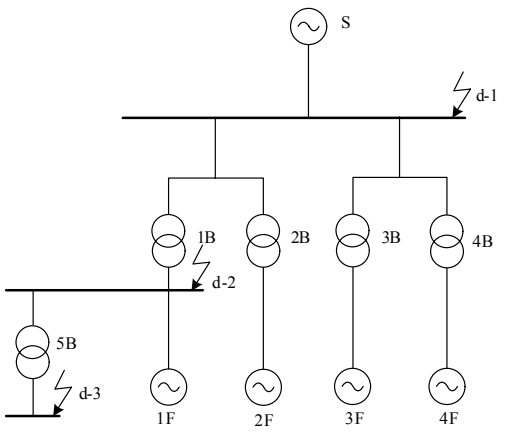


图 6 短路电流计算系统示意图

Fig.6 Configuration of short-circuit current calculation

表 5 三相短路计算结果

Tab.5 Results of three-phase short-circuit current calculation

短路点	分支线名称	短路电流/kA		
		运算曲线法	IEC 标准	ANSI 标准
d-1	S	15.74	16.50	
	1～4F	4.20	3.972	
	合计	19.92	20.47	18.87
d-2	1F	53.53	51.02	
	S	61.905	75.20	
	2～4F	10.53		
	合计	125.82	126.22	116.84
d-3	S	1.181		
	1～4F	1.213		
	合计	2.39	2.53	2.30

4 结论

本文综合比较三种短路电流计算标准或方法，指出短路过程的不同考虑导致各标准计算结果有一定的差异，并通过短路电流曲线的比较得到这种差异的规律性。短路电流计算方法的选择应利用这种规律性，在转移阻抗比较小或很大的情况下，选用计算难度和工作量较小的工程实用方法；否则应根据电机的参数、电网类型和各标准的适用范围慎重选择。

参考文献

[1] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 二版. 北京：中国电力出版社，1995.
LI Guang-qi. Power system transient analysis[M]. Second edition. Beijing：China Electric Power Press，1995.

[2] 周益三. IEC 三相交流系统短路电流计算的使用[J]. 氮肥设计，1994，32（3）：8-13.
ZHOU Yi-san. Calculating the short circuit current of a three-phase alternating current system with IEC method[J] . Technology of Nitrogen Fertilizers，1994，32（3）：8-13.

[3] American National Standards Institute. ANSI C37.5-1969 methods for determining values of a sinusoidal current wave, a normal-frequency recovery voltage, and a guide for calculation of fault currents for application of ac high-voltage circuit breakers rated on a total current basis[S].

[4] 侯剑芸. 短路电流 IEC 算法与实用算法的异同[J]. 电力建设，1997（3）：29-31.
HOU Jian-yun. Difference between IEC algorithm and practical algorithm of short circuit current[J]. Electric Power Construction，1997（3）：29-31

[5] Gene K，Harry S. Comparison of ANSI and IEC 909 short-circuit current calculation procedures[J]. IEEE Transactions on Industry Applications，1993，29（3）：625-630.

[6] Anthony J. A comparison of north American（ANSI）and European （IEC）fault calculation guidelines[J] . IEEE Transactions on Industry Applications，1993，29（3）：515-521.

[7] 谢文，朱永强，崔文进. IEC60909 短路电流计算标准分析[J]. 电网技术，2005，26（2）：23-25.
XIE Wen, ZHU Yong-qiang, CUI Wen-jin. Analysis on short-circuit current calculation standard IEC60909[J]. Power System Technology， 2005，26（2）：23-25.

[8] 吕文杰. 三相短路电流计算方法的探讨[J]. 四川电力技术，2005（5）：35-38.
Lü Wen-jie. Discussion on calculation method of three-phase short-circuit current[J]. Sichuan Power Technology，2005（5）：35-38.

[9] 罗庆跃. 电力系统短路电流计算新方法的研究与实践[J]. 船电技术，2004（1）：38-41.
LUO Qing-yue. New practice and research for short-circuit current calculation of power system[J]. Marine Electric & Electronic Technology，2004（1）：38-41.

[10] 杨杰，邵建雄. 工程短路电流计算方法简析[J]. 人民长江，2000，31（S1）：66-68.
YANG Jie，SHAO Jian-xiong. Analysis of short-circuit current calculation method to the engineering[J]. Yangtze River，2000，31（S1）：66-68.

[11] 苑薇薇，刘红. 电力系统短路计算的新方法—复数短路容量法[J]. 沈阳工业学院学报，1996，15（3）：23-30.
YUAN Wei-wei，LIU Hong. A new method for power system calculation-complex short circuit capacity method[J]. Journal of Shenyang Institute of Technology, 1996，15（3）：23-30.

[12] 刘钢. 短路电流计算中引入电压因数 C 的研究[J]. 吉林电力，2001，2（1）：13-16.
LIU Gang. Research on leading-in voltage factor C in short-circuit current calculation[J] . Jilin Electric Power，2001，2（1）：13-16.

[13] 何仰赞，温增银. 电力系统分析[M]. 三版.武汉：华中科技大学出版社，2002.
HE Yang-zan， WEN Zeng-yin. Electric power system analysis[M]. Third edition. Wuhan：Huazhong University of Science and Technology Press，2002.

[14] 刘万顺. 电力系统故障分析[M]. 二版. 北京：中国电力出版社，1998.
LIU Wan-shun. Power system fault analysis[M]. Second edition. Beijing：China Electric Power Press，1998.

（下转第158页 continued on page 158）

power planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002，26（23）：1-4.
[11] 刘明波，李健，吴捷. 求解无功优化的非线性同伦内点法[J]. 中国电机工程学报，2002，22（1）：1-7.
LIU Ming-bo，LI Jian，WU Jie. Nonlinear homogeneous interior-point method for reactive-power optimization[J]. Proceedings of the CSEE，2002，22（1）： 1-7.
[12] Lou S H，Wu Y W，Xiong X Y，et al. A parallel PSO approach to multi-objective reactive power optimization with static voltage stability consideration[C].// Transmission and Distribution Conference，IEEE. Peru. 2006：172-176.
[13] Kennedy J，Eberhart R. Particle swarm optimization[C].// Proc IEEE International Conf on Neural Networks. Perth(Australia):1942-1948.
[14] Konstantinos E，Parsopoulos，Michael N，et al. On the computation of all global minimizers through particle swarm optimization[J]. IEEE Trans Evol Comput，2004，8（3）：211-224.
[15] Asanga R，Saman K，Halgamuge. Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time-varying acceleration coefficients[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation，2004，8（3）： 240-255.
[16] Parsopoulos K E，Vrahatis M N. Particle swarm optimization in multiobjective problems[C]. //Proceeding of the ACM 2002 Symposium on Applied Computing. Spain(Madrid): 2002：603-607.
[17] Deb K，Pratap A，Agarwal S，et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm：NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation，2002，6（2）：182-197.
[18] Mahfouf M，Chen M Y，Linkens D A. Adaptive weighted particle swarm optimization for multi-objective optimal design of alloy steels[J]. Lecture Notes in Computer Science，2004，3242： 762-771.
[19] 陈民铀，张聪誉，罗辞勇. 基于自适应进化粒子群算法的多目标优化方法[J]. 系统仿真学报，2009，21（22）：7061-7065.
CHEN Min-you，ZHANG Cong-yu，LUO Ci-yong. An adaptive evolutionary particle swarm algorithm for multi-objective optimization[J]. Journal of System Simulation，2009，21（22）：7061-7065.
[20] Corne D W，Jerram N R，Knowles J D，et al. PESA-II：Region-based selection in evolutionary multiobjective optimization[C]. //Proc of the Genetic and Evolutionary Computing Conf. Morgan(Kaufmann): 2001：283-290.
[21] Li X D. A non-dominated sorting particle swarm optimizer for multiojective optimization[J]. Lecture Notes in Computer Science，2003，2723：37-48.
[22] Zhang Q F，Zhou A，Jin Y. RM-MEDA：a regularity model-based multiobjective estimation of distribution algorithm[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation，2008，12（1）：41-63.
[23] 冯士刚，艾芊. 利用强度Pareto进化算法的多目标无功优化[J]. 高压电技术，2007（9）：115-119.
FENG Shi-gang，AI Qian. Multi-objective reactive power optimization using SPEA2[J]. High Voltage Engineering，2007（9）：115-119.
[24] 张伯明，陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京： 清华大学出版社，1996.
ZHANG Bo-ming，CHEN Shou-sun. Advanced analysis of power system[M]. Beijing：Tsinghua University Press，1996.

收稿日期：2009-11-09； 修回日期：2010-01-19

作者简介：

张聪誉（1982-），男，硕士生，主要研究方向是电力系统优化等；E-mail：zhang_cy@foxmail.com

陈民铀（1954-），男，博士生导师，主要研究方向是智能控制、进化计算的多目标优化等；

罗辞勇（1973-），男，博士，主要研究方向是智能控制理论及应用等。

（上接第 152 页 continued from page 152）

[15] 许跃进. 应用运算曲线求取短路电流时电源计算电抗的通用算法[J]. 电力自动化设备，2000，20（4）：22-24.
XU Yue-jin. Common algorithm for computing power source calculating reactance in applying operational curve to solve fault current[J]. Electric Power Automation Equipment，2000，20（4）：22-24.
[16] 余晓丹，周树棠，余国平，等. 两种实用短路计算方法分析[J]. 电力系统及其自动化学报，2006，18（4）：109-112.
YU Xiao-dan，ZHOU Shu-tang，YU Guo-ping，et al. Discussion on two practical methods for fault current calculation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA，2006，18（4）：109-112.

收稿日期：2009-10-30； 修回日期：2009-11-28

作者简介：

王 寓（1986-），男，硕士研究生，主要从事电力系统运行与优化研究；E-mail：wangyu795327@yahoo.com.cn

王主丁（1964-），男，教授，IEEE 高级会员，主要从事电力系统运行与优化研究；

张宗益（1964-），男，教授，博导，研究方向为电力技术经济分析，技术管理等。