

电力系统短路电流直流分量及其对 断路器开断能力的影响

曹伟¹, 王永生¹, 张文青¹, 杨秀¹, 靳希¹, 刘蓓²

(1. 上海电力学院 电力与自动化工程学院, 上海市 杨浦区 200090;

2. 上海市电力公司, 上海市 浦东区 200122)

Analysis on DC Component in Short-Circuit Current of Power Grid and Its Influence on Breaking Ability of Circuit Breakers

CAO Wei¹, WANG Yongsheng¹, ZHANG Wenqing¹, YANG Xiu¹, JIN Xi¹, LIU Bei²

(1. School of Electric Power and Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Yangpu District, Shanghai 200090, China; 2. Shanghai Municipal Electric Power Company, Pudong District, Shanghai 200122, China)

ABSTRACT: There are two main components in short-circuit current of power system, i.e., the periodical component and direct current (DC) component, however in engineering application there is no special attention paid to the latter. The attenuation of DC component of short-circuit current in EHV power transmission network is presented in two aspects, namely simulation and actual recorded fault data, and the influence of DC component on breaking ability of circuit breakers being operated. Finally, the breaking ability and making capability of circuit breakers being operated are synthetically evaluated, and following conclusion are obtained: if the breaking ability of circuit breaker is checked by periodical component in short-circuit current, it is necessary to keep out the margin of breaking ability in the range from 10% to 30% to take possibly existing DC component in the fault current to be switched off; as for the circuit breaker being operated in limited operation mode, the breaking ability of circuit breaker to be considered is its rated breaking capacity, but not the making capability.

KEY WORDS: short-circuit current; circuit breaker; interrupting capability; DC offset; fault-recording

摘要: 短路电流中的周期分量和直流分量对系统短路容量都有贡献,而后者在工程应用中并没有引起足够的重视。从仿真计算和实际故障录波 2 方面介绍了超高压输电网中短路电流直流分量的衰减情况,定量估计了直流分量对运行中的断路器开断能力的影响。最后,对运行中的断路器的开断能力和关合能力做出了综合评价,并得出结论:如果按短路电流周期分量校核断路器开断能力,则需要留有 10%~30%的裕

度,以考虑开断电流中可能存在的直流分量;限制运行中的断路器使用的仍是其开断能力而不是其关合能力。

关键词: 短路电流; 断路器; 开断能力; 直流分量; 故障录波

0 引言

随着电力系统的发展,电源间的联系越来越紧密,系统短路容量超标问题也越来越突出^[1]。目前,国内对短路电流计算的关注主要集中在短路电流周期分量的计算方面^[2-4],实际工程应用中对短路电流中的直流分量及其衰减缺乏应有的重视。文献[5-8]都曾经提及短路电流直流分量对断路器开断能力的影响,但都仅限于转述我国的高压断路器标准^[9]中的有关描述,未就实际电力系统的情况进行具体分析,更未对影响程度作出定量估计。

本文以上海电力系统为研究对象,从短路仿真分析和短路实际故障录波分析 2 方面考察其短路电流直流分量的衰减特性,由此评判相关的工程应用是否合理,并给出短路电流直流分量对断路器开断能力影响的定量分析。

1 短路电流直流分量衰减时间常数及其变化趋势

电力系统发生短路后,短路电流中含有周期分量和直流分量,直流分量以电力网络的时间常数衰减。GB 1984—2003《高压交流断路器》^[9]规定:直流分量衰减的标准时间常数为 45 ms,特殊工况下的直流分量衰减时间常数为 120、75、60 ms;在主要以电力变压器供电的网络中,直流分量的时间

基金项目: 国家电网公司科技项目(08310531111696)。

Science and Technology Project Supported by State Grid Corporation of China(08310531111696)。

常数几乎完全取决于电力变压器,通常超过 45 ms,并且可能长至 150 ms;一般理论认为,电力系统(除特高压系统外)短路电流直流分量可能的最大起始值为短路瞬间短路电流周期分量的幅值。

随着电力系统中发电机、变压器容量的增大和输电网电压等级的提高,各元件的 X/R 比值增大,短路电流直流分量衰减时间常数逐渐增大。此外,电源间联系的加强,短路电流限制措施的使用都有可能使短路电流直流分量的衰减时间常数进一步增大。

2 上海电网中短路电流直流分量的衰减情况

2.1 直流分量衰减仿真计算

采用电磁暂态仿真程序 (electromagnetic transients program, EMTP)对 2008 年底上海电网短路电流直流分量进行了仿真计算,计算所用电力系统模型考虑了上海电网内部和上海周边对上海影响较大的 220 kV 及以上电网及其接入电源的详细模型,对华东电网的其他部分进行了等值,等值后的电力系统模型含 118 台发电机、158 台变压器、192 个网络等值负荷和 441 条输电线。用 PSS/E 机电暂态仿真模块在上海各 500 kV 母线设置短路点,就短路电流的周期分量进行等值效果检验,等值前和等值后各时刻的短路电流周期分量相差都在 0.5% 以内,即等值前后短路电流的周期分量基本相当。为了检验等值前后直流分量的差别,在上海电网内部选择了数个分区,逐一按本文等值外网的方法进行分区等值,然后计算分区等值前后分区联变 500 kV 母线短路电流的直流分量,其差别如图 1 所示。由图 1 可知:分区等值前后,短路电流的直流分量值虽然存在较明显的差别,但其衰减规律基本相同。

用 EMTP 建立外网等值后的上海电网电磁暂态模型,分别计算上海电网 500 kV 母线短路、220 kV 母线短路,得短路后各个时刻的全电流瞬时值,从瞬时值中分离出直流分量,再拟合其衰减时

间常数,结果如表 1 所示,表中 T_a 为短路电流的直流分量衰减时间常数。由表 1 可知:上海电网 500 kV 母线短路电流的直流分量衰减较慢,时间常数平均约 71 ms,明显大于断路器标准时间常数(45 ms);220 kV 母线短路电流的直流分量衰减较慢,甚至慢于 500 kV 母线短路直流分量衰减,时间常数平均约 93 ms,远大于断路器标准时间常数(45 ms)。

表 2、3 是 EMTP 仿真计算所得的上海电网各

表 1 上海电网部分短路点及其
短路电流直流分量衰减时间常数

Tab. 1 Time constants of DC offset decrement of Shanghai power grid short circuit current			
500 kV 母线		220 kV 母线	
短路点	T_a /ms	短路点	T_a /ms
南桥	65.30	江川	67.71
黄渡	51.93	闵行	84.70
徐行	57.12	浦建	77.97
杨高	65.02	高东	94.80
顾路	80.37	银山	86.76
外二厂	77.71	洲海	97.32
杨行	112.92	石洞口	94.76
泗泾	70.76	新潭	123.11
石二厂	59.11	外高桥	117.21

表 2 500 kV 母线短路 40 ms 后的
短路电流周期分量和直流分量

Tab. 2 Symmetrical current and its DC offset of shor-circuit current at 40 ms after the initiation of fault at 500 kV busbar				
短路点	直流 分量/kA	周期 分量/kA	直流分量 含量/%	全电流 有效值/kA
南桥	26.96	44.12	43.22	51.71
黄渡	23.36	43.80	37.72	49.64
徐行	30.98	42.90	51.07	52.92
杨高	29.67	46.37	45.25	55.05
顾路	39.44	51.37	54.30	64.76
外二厂	38.98	51.73	53.29	64.77
杨行	40.20	45.38	62.65	60.62
泗泾	25.70	39.58	45.92	47.19
石二厂	24.77	41.06	42.66	47.95

表 3 220 kV 母线短路 40 ms 后的
短路电流周期分量和直流分量

Tab. 3 Symmetrical current and its DC offset of short-circuit current at 40 ms after the initiation of fault at 220 kV busbar				
短路点	直流 分量/kA	周期 分量/kA	直流分量 含量/%	全电流 有效值/kA
江川	20.78	34.82	42.21	40.55
闵行	26.38	37.53	49.71	45.87
浦建	27.15	36.36	52.81	45.38
高东	34.07	43.56	55.31	55.30
银山	28.83	36.35	56.09	46.39
外高桥	42.07	42.89	69.37	60.08
石洞口	32.19	35.79	63.61	48.14
新潭	35.60	34.08	73.88	49.28
龙东	33.02	39.15	59.65	51.22

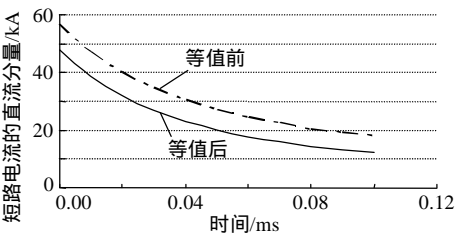


图 1 南桥 500 kV 母线短路电流的直流分量衰减情况
Fig. 1 Decrement of DC offsets when three-phase
short-circuited at Nanqiao 500 kV busbar

短路点短路 40 ms 后的短路点短路电流周期分量和直流分量数值,及其对应的直流分量含量和短路全电流有效值。由表 2、3 可知,若断路器故障 40 ms 后断开故障电流,则故障电流的直流分量含量基本都在 40% 以上,远大于文献[9]中规定的可以仅用短路电流周期分量来标定其开断能力的最大直流分量含量的 20%。由此推论,在这种情况下检验断路器开断能力要用短路全电流有效值。

2.2 故障录播直流分量的衰减情况

2009 年 3 月 7 日上午,上海外二厂因误操作发生 500 kV 母线三相金属性短路故障,故障录波装置记录了短路过程中的短路电流瞬时值^[10]。从短路电流瞬时值中分解出直流分量,取直流分量最大的一相(此例中为 A 相)拟合其直流分量衰减时间常数,为 86.8 ms。理论上,在三相参数对称的情况下,中性点电流、三相电流瞬时值之和都应为三相直流分量之和,也可以用来拟合直流分量衰减的时间常数。此例中,根据三相瞬时值分解出的周期分量对称情况很好,可认为是三相对称的。拟合中性点电流、三相电流瞬时值之和分别得衰减时间常数为 76.9 ms 和 72.1 ms,与表 1 中仿真计算得到的外二厂 500 kV 母线短路时直流分量衰减时间常数 77.7 ms 接近。

文献[11]对华东电网 2000—2005 年调度中心所记录的大部分短路情况(主要是单相短路)进行了分析统计,直流分量衰减时间常数超过 60 ms 的,达 4.5%。

3 直流分量对断路器开断能力和关合能力的影响

3.1 直流分量对断路器开断电流的影响

断路器需开断的短路电流是周期分量和直流分量的叠加,其可能的最大有效值为

$$I_{\text{basymb}} = \sqrt{I_b^2 + I_{\text{DC}}^2} = I'' \sqrt{1 + 2K^2} \quad (1)$$

式中: I_b 为开断时刻的短路电流周期分量; I_{DC} 为开断时刻的短路电流直流分量; I'' 为次暂态电流; K 为开断时刻直流分量相对于直流分量初始值的衰减系数,其值为

$$K = e^{\frac{-t}{T_a}} \quad (2)$$

式中: t 为短路开断时刻(短路时 $t=0$); T_a 为直流分量衰减的时间常数。

由式(1)(2)可知,短路电流直流分量的衰减速度

或时间常数关系到断路器需开断电流的大小,直流分量衰减越慢,断路器需开断的短路电流越大;同时,断路器需开断的电流也与短路被开断时刻有关,短路被开断得越快,断路器需开断的电流越大。

3.2 直流分量对断路器承受的短路冲击电流的影响

断路器需承受的短路冲击电流

$$i_{\text{sh}} = \sqrt{2} K_{\text{im}} I'' \quad (3)$$

式中 K_{im} 为冲击系数,其值为

$$K_{\text{im}} = 1 + e^{\frac{-0.01}{T_a}} \quad (4)$$

由式(3)(4)可知,短路电流直流分量的衰减速度或时间常数关系到断路器需承受的冲击电流的大小,直流分量衰减越慢,需承受的冲击电流也越大,但冲击电流的大小与短路被开断的快慢无关。

3.3 直流分量对断路器开断电流和关合电流的影响

设 I_{Nbr} 为断路器额定开断电流,根据文献[8],如果直流分量不超过 20%,额定短路开断电流仅由交流分量有效值表征,即此时断路器应满足

$$I_b \leq I_{\text{Nbr}} \quad (5)$$

而当直流分量超过 20%,额定短路开断电流由 2 个值表征:交流分量有效值、直流分量百分数,此时断路器需满足

$$I_{\text{basymb}} \leq I_{\text{Nbr}} \quad (6)$$

为叙述方便,本文将按开断时直流分量不超过 20% 来标定其额定开断电流的断路器称为常规断路器。

当断路器合闸到已经短路的系统中(如在设备检修后忘记拆除接地线)时,合闸过程中就会发生短路故障。断路器的额定关合电流 i_{Ncl} 为表征断路器关合短路故障能力的参数,其数值不应小于断路器安装处短路电流最大可能的瞬时值 i_{sh} (即短路冲击电流)

$$i_{\text{sh}} \leq i_{\text{Ncl}} \quad (7)$$

大系统中短路电流直流分量及其衰减难以计算,电力系统中使用的绝大多数断路器都按开断时直流分量不超过 20% 和直流分量衰减标准时间常数(45 ms)来设置其额定开断电流和额定短路关合电流,即常规断路器仅用短路电流周期分量来表征其额定开断电流,额定短路关合电流是额定短路开断电流的 2.5 倍(冲击系数 1.8,对应 45 ms 的直流分量衰减时间常数)。例如,额定开断电流为 50 kA

的断路器是指其开断短路电流周期分量的能力是 50 kA, 开断时直流分量含量不超过 20%, 其额定短路关合电流为 125 kA; 而额定开断电流为 63 kA 的断路器是指其开断短路电流周期分量的能力是 63 kA, 开断时直流分量含量不超过 20%, 其额定短路关合电流为 157 kA。

经计算, 若电力系统短路电流直流分量衰减时间常数是 45 ms, 故障切除时间大于(等于)70 ms 时, 最大可能的直流分量含量才能不大于 20%。而根据华东电网的统计, 其超高压网中切除短路故障的时间在 50 ms 内的已达 16%^[11]。即使假设 45 ms 的直流分量衰减时间常数, 考虑短路较快切除的情况, 即 40 ms 切除故障, 直流分量含量仍可高达 41%, 显然应该用短路全电流校核断路器开断能力。这种情况下若仍用前述常规断路器, 则计及其可开断的短路全电流中 20% 的直流分量, 式(6)可修正为

$$I_{\text{basymb}} \leq 1.04 I_{\text{Nbr}} \quad (8)$$

式中的 1.04 是将 20% 的直流分量含量(等效于式(1)中的直流分量衰减系数 $K=0.2$)代入式(1)而得的全电流有效值对周期分量有效值的比值。

4 常规断路器开断能力与关合能力评价

4.1 常规断路器开断能力评价

由式(1)(8)得

$$I'' \leq \frac{1.04}{\sqrt{1+2K^2}} I_{\text{Nbr}} \quad (9)$$

常规断路器可由式(9)来校核其断路器开断能力, 以充分考虑直流分量对断路器开断能力的影响。相当于考虑直流分量后, 若仍以暂态电流为核心来校核常规断路器的开断能力, 则等效于其开断能力下降 $1.04/\sqrt{1+2K^2}$ 倍, 具体数值见表 4。表 4 中, 500 kV 系统和 220 kV 系统短路对应的直流分量衰减时间常数是综合了前述电磁暂态仿真计算所得和实际故障录波所得, 选取了文献[8]推荐的特殊工况下的时间常数 75 ms 和 120 ms。

设短路 40 ms 后断路器开断短路电流, 则考虑

表 4 常规断路器等效开断能力下降倍数

Tab. 4 Discount factor of normal circuit breaker breaking capability

电压 等级/kV	T_d/ms	K	等效开断能力下降倍数	
			直流分量 初始含量 100%	直流分量 初始含量 87%
500/220	45	0.41	0.90	0.93
500	75	0.59	0.80	0.84
220	120	0.72	0.73	0.78

直流分量影响后的常规断路器等效开断能力下降

倍数在直流分量衰减时间常数分别为 45、75、120 ms 时对应的值为 0.9、0.8、0.73。以上数值是考虑最不利的情况假设直流分量初始(即短路时刻)含量最高为 100%时得到的。

设短路前空载, 根据向量图分析, 在任意时刻发生短路, 三相直流分量中初始含量总有一相会超过 87%。设直流分量初始含量为 87%、短路 40 ms 后切除故障, 直流分量衰减时间常数分别为 45、75、120 ms 时常规断路器的等效开断能力下降倍数为 0.93、0.84、0.78。

欧美很早就意识到了快速切除故障时直流分量对断路器开断能力的影响, 欧洲在表征快速动作的断路器开断能力时用 2 个指标, 其一为短路电流周期分量的额定开断值, 其二为短路全电流的额定开断值, 通常后者比前者高 25%^[12-13]。

美国国家标准^[14]也规定仅当断路器安装处的最大三相短路电流周期分量小于其额定开断电流的 80%、最大单相短路电流周期分量小于其额定开断电流的 70% 时, 可用短路电流周期分量来校核断路器开断能力; 否则应考虑短路电流中直流分量的影响, 将实际计算得到的三相短路电流周期分量乘以 1.25(相当于本文中的等效开断能力下降倍数 0.8)、单相短路电流周期分量乘以 1.41(相当于本文中的等效开断能力下降倍数 0.7)后去校核断路器的开断能力。以上规定在其工程实践中得到了具体的应用^[15], 如电力系统分析软件 PSS/E、ETAP Powerstation 都可计算直流分量对短路全电流的影响^[16]。

DL/T 615—1997《交流高压断路器参数选用导则》对短路电流中的直流分量也有相应的叙述, 提出断路器订货时应对其分闸时直流分量含量提出具体要求^[17]。

4.2 考虑动态负荷影响后常规断路器开断能力评价

式(9)没有考虑电动机反馈电流对短路电流周期分量初始有效值和直流分量初始值的影响。假设短路 40 ms 后断开短路电流, 仿真计算表明: 开断时短路电流的周期分量已下降到不考虑电动机反馈电流时计算所得的次暂态电流以下, 所以仍可用通常不考虑电动机反馈电流时求出的次暂态电流作为开断电流中的周期分量^[3]。但电动机反馈电流

影响开断电流直流分量的初始值,从而进一步影响到开断时刻短路全电流。考虑电动机反馈电流后式(9)应修正为

$$I'' \leq \frac{1.04}{\sqrt{1+2K_L^2K^2}} I_{Nbr} \quad (10)$$

式中 K_L 为电动机反馈系数。

此时,常规断路器等效开断能力下降倍数为 $1.04/\sqrt{1+2K_L^2K^2}$,当 $K_L=1.1$ 时,其具体数值见表5。

表5 考虑电动机反馈电流后的
常规断路器等效开断能力下降倍数

Tab. 5 Discount factor of normal circuit-breaker breaking capability with motor feedback current considered

电压 等级/kV	T_a/ms	K	等效开断能力下降倍数	
			直流分量 初始含量 100%	直流分量 初始含量 87%
500/220	45	0.41	0.88	0.91
500	75	0.59	0.77	0.81
220	120	0.72	0.69	0.75

对比表4、5可知,考虑电动机反馈电流后,常规断路器的等效开断能力进一步下降,但只下降3%左右。

4.3 常规断路器开断能力与关合能力综合评价

由式(3)(7)得

$$i_{sh} = \sqrt{2} K_{im} I'' \leq i_{Ncl} \quad (11)$$

考虑电动机反馈电流时

$$i_{sh} = \sqrt{2} K_L K_{im} I'' \leq i_{Ncl} \quad (12)$$

由式(10)可得

$$\frac{\sqrt{1+2K_L^2K^2}}{1.04} I'' \leq I_{Nbr} \quad (13)$$

已知常规断路器额定关合电流与额定开断电流(由周期分量表征)之比为2.5(即 $i_{Ncl}/I_{Nbr}=2.5$),而式(12)的左侧表达式除以式(13)的左侧表达式为 $1.04\sqrt{2}K_LK_{im}/\sqrt{1+2K_L^2K^2}$,其值在前述各种可能的反馈系数、冲击系数、直流分量衰减系数和短路电流直流分量初始含量的组合下都小于2.5,即式(10)如果满足,则式(12)必然满足。由此推论,将常规断路器用于500kV及以下的网络,考虑直流分量对其开断能力的影响后若其开断能力足够大,则其承受短路冲击电流的能力也必足够大,现超高压电网存在的仍是断路器断流能力不够的问题。

5 结论

1) 由于超高压系统短路故障的快速切除和直

流分量衰减缓慢的双重作用,使断路器开断时短路电流的直流分量含量超过20%,校核断路器开断能力需用短路全电流有效值。

2) 若仍以短路电流周期分量起始有效值即次暂态电流来校核常规断路器的开断能力,考虑直流分量影响后,相当于断路器的等效开断能力下降,大致下降到原值的0.9~0.7;换言之,按短路电流周期分量校核断路器开断能力时要留有10%~30%的裕度,以考虑开断电流中可能存在的直流分量。短路电流被断开得越快,直流分量衰减越慢,断路器等效开断能力下降越大,即留的裕度要越大。

3) 电动机反馈电流对断路器等效开断能力的影响小于3%~4%。

4) 考虑直流分量对断路器开断能力的影响后,限制常规断路器使用的仍是其开断能力,即若其开断能力足够大,则其承受短路冲击电流的能力也必足够大。

参考文献

- [1] 阮前途. 上海电网短路电流控制的现状与对策[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 78-83.
Ruan Qiantu. Present situation of short circuit current control in Shanghai power grid and countermeasures[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 78-83(in Chinese).
- [2] 张勇, 王云辉, 沈建涛, 等. 输电网短路电流计算[J]. 电网技术, 2007, 31(S1): 39-42.
Zhang Yong, Wang Yunhui, Shen Jiantao, et al. Research of short-circuit current calculation in transmission network[J]. Power System Technology, 2007, 31(S1): 39-42(in Chinese).
- [3] 曹伟, 王伟, 刘蓓, 等. 受端电网负荷动态特性与三相短路电流相关性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5): 61-65.
Cao Wei, Wang Wei, Liu Bei, et al. Analysis on relativity between load dynamics and three-phase short-circuit current of receiving-end power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(5): 61-65(in Chinese).
- [4] 国家技术监督局. GB/T 15544—1995 三相交流系统短路电流计算标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [5] 罗为, 丘家驹, 魏路平. 电力系统断路器遮断容量实时校核[J]. 华东电力, 2004, 32(4): 17-19.
Luo Wei, Qiu jiaju, Wei Luping. Real-time check of circuit breaker interrupting capacity in power system[J]. East China Electric Power, 2004, 32(4): 17-19(in Chinese).
- [6] 蒲如兰. 短路电流中的周期分量和非周期分量对高压断路器运行状态的影响[J]. 福建电力与电工, 1994, 14(2): 20-22, 12.
Pu Rulan. The effect of symmetrical short-circuit current and its DC offset on high voltage circuit breaker operating conditions[J]. Fujian Electric Power and Electrotechnics, 1994, 14(2): 20-22, 12(in Chinese).
- [7] 袁洪平, 李冬根. 短路电流对高压断路器及其开断电流选择的影响[J]. 江西电力, 2009, 33(1): 42-45.
Yuan Hongping, Li Donggen. The effect of short-circuit current on high voltage circuit breakers and its interrupting current[J]. Jiangxi

- Electric Power, 2009, 33(1): 42-45(in Chinese).
- [8] 范锡普, 熊信银, 朱永利. 发电厂电气部分[M]. 北京, 中国电力出版社, 2004: 170-181.
- [9] 全国高压开关设备标准化技术委员会. GB 1984—2003 高压交流断路器[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [10] 李建华, 黄志龙, 刘蓓. 500 kV 母线短路故障的分析[J]. 华东电力, 2009, 37(7): 1166-1170.
- Li Jianhua, Huang Zhilong, Liu Bei. Analysis of short-circuit faults of 500 kV buses[J]. East China Electric Power, 2009, 37(7): 1166-1170(in Chinese).
- [11] 刘兆林, 殷敏莉. 华东 500 kV 电网短路电流情况的调查[J]. 高压电器, 2008, 44(3): 221-224.
- Liu Zhaolin, Yin Minli. Analysis of short-current failures of the 500 kV power system in East China grid[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(3): 221-224(in Chinese).
- [12] Sickle R C. Is the european circuit-breaker rating system really more conservative than the american?[J]. Power Apparatus and Systems Part III: Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1953, 72(2): 1100-1114.
- [13] Catlett R, Anderson J, Chassereau L. Three-cycle breaker applications[J]. Industry Applications Magazine, 2005, 11(5): 33-43.
- [14] IEEE Std C37.010—1999 IEEE Application guide for AC high-voltage circuit breakers rated on a symmetrical current basis[S].
- [15] Nguyen T C, Chan S, Bailey R, et al. Auto-check circuit breaker interrupting capabilities[J]. IEEE Computer Applications in Power, 2002, 15(1): 24-28.
- [16] 曹伟, 丁北平, 凌晓波, 等. PSS/E BKDY 短路计算模块评述[J]. 华东电力, 2011, 39(2): 271-274.

- Cao Wei, Ding Beiping, Ling Xiaobo, et al. Evaluation of PSS/E BKDY short-circuit current calculation module[J]. East China Electric Power, 2011, 39(2): 271-274(in Chinese).
- [17] 电力部高压开关设备标准化技术委员会. DL/T 615—1997 交流高压断路器参数选用导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 1997.



曹伟

收稿日期: 2011-03-29.

作者简介:

曹伟(1963), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为电力系统分析与控制, E-mail: cw-jenny@163.com;

王永生(1982), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析与控制, E-mail: wysWILL@126.com;

张文青(1982), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统暂稳态分析, E-mail: Zwq618@163.com;

杨秀(1972), 男, 教授, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制, E-mail: yangxiu72@263.net;

靳希(1947), 男, 教授, 主要研究方向为电力系统运行与控制, E-mail: jinxiche@163.com;

刘蓓(1959), 女, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全运行与计算, E-mail: Liubei@sh.sgcc.com.cn.

(编辑 蒋毅恒)