

一种基于故障轨迹的暂态能量裕度计算方法

夏成军^{1,2}, 茹锋¹, 胡会骏², 何仰赞²

(1. 江苏省电力公司博士后工作站, 江苏 南京 210036; 2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 基于系统故障轨迹求取系统暂态能量裕度可以解决暂态能量函数法的模型适应性问题, 在电力系统暂态稳定评估中具有重要意义。深入研究了去掉线性路径假设导致的部分区间内无法沿故障轨迹计算暂态势能的问题, 并提出以故障清除时刻为暂态势能参考点和补偿裕度的概念, 给出了一种沿故障轨迹的暂态能量裕度计算方法。仿真计算表明了该方法的有效性。

关键词: 暂态能量裕度; 暂态能量函数; 故障轨迹

中图分类号: TM711; TM744 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)18-0001-05

0 引言

暂态能量函数法用暂态能量裕度 TEM (Transient Energy Margin) 作为系统稳定程度的度量, 通常也称为稳定裕度, 其定义为临界情况下系统的暂态能量和故障清除时刻系统的暂态能量差值 $V = V_{cr} - V_c$ 。其计算方法主要有: 主导不稳定平衡点 (CUEP) 法、势能边界面 (PEBS) 法和基于稳定域边界的主导不稳定平衡点 (BCU) 等方法。但这些方法通常基于经典模型和线性路径假设, 在多群摇摆和多摆失稳的情况下, 可能错误地判别系统稳定性。

混合法^[1]结合了时域仿真法计算准确、可靠、模型适应性强的优点和暂态能量函数法能给出量化信息的优点, 成为目前进行稳定评估的最优方案。但是, 如何将时域仿真法和暂态能量函数法有效结合, 是一个需要认真解决的问题。其难点是当系统采用复杂模型时, 如何沿实际故障轨迹计算系统的稳定裕度。

从时域仿真结果中获取系统稳定程度的定量信息, 存在这样几种方法: 从时域仿真结果定性判别系统是否稳定, 如果系统不稳定, 则将系统模型转换为相对应的经典模型, 然后应用暂态能量函数法计算暂态能量裕度; 如果系统稳定, 则再次注入故障直到系统临界不稳定, 二次注入的暂态能量就是系统的暂态能量裕度^[2]。从动力学角度出发, 分析系统暂态能量及其转换关系, 推导出一种轨迹暂态能量函数, 然后以此为基础, 构造一种量化稳定指标 SI 和不稳定指标 UI。不稳定指标的物理意义是: 系统受扰轨迹远离稳定边界而没有被系统吸收的剩余能量。稳定指标的物理意义是: 为了使系统受扰轨迹到达稳定边界而必须向系统进一步注入的扰动能量^[3]。用单机能量函数法来分析时域仿真结

果, 确定单台发电机的稳定指标和不稳定指标, 并认为临界机组的稳定指标和不稳定指标代表了系统的稳定裕度^[4~6]。在给定的故障扰动下将机组分为临界机组及非临界机组两群, 用修正的暂态能量裕度^[7]进行稳定评估。EEAC 法^[8]。

本文分析了在去掉线性路径假设和应用复杂模型的情况下, 计算系统的暂态能量裕度存在的困难, 提出以故障清除时刻作为暂态势能参考点和补偿裕度的概念, 并给出了基于故障轨迹的暂态能量裕度计算方法。应用电力系统分析综合程序 PSASP 对 NES39 节点系统进行时域仿真计算, 并用所提方法从时域仿真结果得到了系统的暂态能量裕度, 从而验证了所提方法的有效性。

1 问题的提出

为了直观地提出本文需要解决的问题, 以单机无穷大母线 (OMIB) 系统为例, 其故障前、故障期间、故障清除后的功角曲线如图 1 中 $P_e^{(1)}$ 、 $P_e^{(2)}$ 、 $P_e^{(3)}$ 所示。其中 θ_0 为故障清除前系统稳定运行点, θ_s 、 θ_u 分别表示故障清除后系统的稳定平衡点、不稳定平衡点, θ_c 为故障清除点, θ_{cr} 为临界故障清除点, θ_{FEP} 为稳定情况下故障轨迹最远点^[8]。

OMIB 系统的运动方程如式 (1) 所示:

$$\begin{cases} M \frac{d^2}{dt^2} = P_m - P_e \\ \frac{d}{dt} = \end{cases} \quad (1)$$

应用暂态能量函数法对 OMIB 系统进行分析时, 定义系统的暂态动能 V_{KE} 为

$$V_{KE} = \frac{1}{2} M \dot{\theta}^2 \quad (2)$$

以故障清除后的稳定平衡点 S 为参考点, 定义

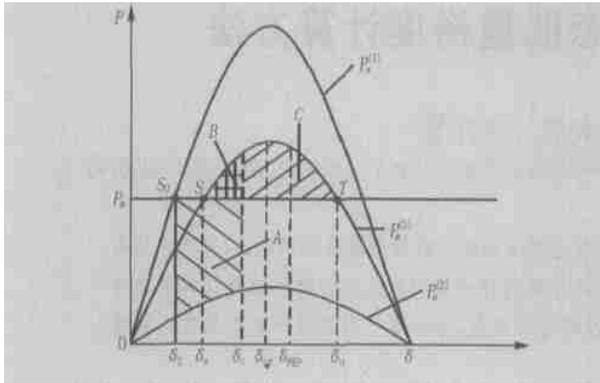


图1 OMIB系统

Fig. 1 OMIB system

故障清除后系统的暂态势能 V_{PE} 为

$$V_{PE} = \int_s^c (P_e^{(3)} - P_m) d\delta \quad (3)$$

在经典模型下,系统在故障清除后轨迹上任意一点 (δ, P) 的暂态能量 $V(\delta, P) = V_{KE} + V_{PE}$ 守恒。

则故障清除时刻系统的暂态动能和暂态势能分别为

$$V_{KE}|_c = \frac{1}{2} M \dot{\delta}_c^2 = \int_0^c (P_m - P_e^{(2)}) d\delta \quad (4)$$

$$V_{PE}|_c = \int_s^c (P_e^{(3)} - P_m) d\delta \quad (5)$$

系统在故障清除时刻总的暂态能量 $V_E|_c$ 为

$$V_E|_c = V_{KE}|_c + V_{PE}|_c \quad (6)$$

系统的临界能量 V_{cr} 为:

$$V_{cr} = \int_s^u (P_e^{(3)} - P_m) d\delta \quad (7)$$

系统的暂态能量裕度为:

$$V = V_{cr} - V_E|_c \quad (8)$$

在经典模型和线性路径假设下,可应用以上公式得到系统的暂态能量裕度,并可推广应用到 n 机系统。当对于复杂系统模型、去掉线性路径假设条件,沿实际故障轨迹计算系统的暂态能量裕度时,暂态能量裕度的计算就产生了两个问题:

1) 故障清除时刻的暂态势能计算

从故障发生时刻 t_0 到故障清除时刻 t_c 这一时间段内,时域仿真法给出了机组的机械功率和电磁输出功率,但是要注意,这一电磁输出功率曲线是故障期间的电磁功率,即对应于图 1 中的 $P_e^{(2)}$ 。按照暂态势能计算公式(5),积分中用到的是 $P_e^{(3)}$,即故障清除后的电磁输出功率曲线。对于非自治系统,该电磁输出功率曲线是和机组轨迹相关的,无法由时域仿真结果给出。如果以故障清除后的稳态平衡

点 S 作为暂态势能参考点,则在 (δ_s, δ_c) 区间内沿着故障轨迹无法计算故障清除时刻的暂态势能。

2) 稳定情况下稳定裕度计算

对于给定预想故障,如果系统能够保持稳定,那么在机组摇摆过程中,存在一最远点 FEP ,系统的实际运行轨迹无法越过 FEP 点到达 u 点,在区间 (δ_{FEP}, δ_u) 内无法沿故障轨迹计算故障清除后最大可能的减速面积,也就无法给出系统的稳定裕度。

2 解决方法

解决上述问题的基本思路是先针对 OMIB 系统提出解决方法,然后将该方法推广到机 n 系统。

2.1 OMIB 系统

通过选择故障清除时刻为暂态势能参考点、引入补偿裕度的概念可以解决上述问题。

1) 以故障清除时刻为暂态势能参考点

图 1 中面积 $(A + B)$ 表示故障清除时刻的暂态能量,面积 $(B + C)$ 表示临界能量,其中面积 B 为公共项,因此稳定裕度实际上和暂态势能参考点无关,而是最大可能的减速面积 C 和故障期间加速面积 A 的差值。这等价于选择故障清除时刻的 δ_c 为暂态势能参考点。因此选择故障清除时刻的 δ_c 为暂态势能参考点,则问题 1 圆满解决。

此时,故障清除时刻系统的暂态能量计算如下:

$$V_{KE}|_c = \frac{1}{2} M \dot{\delta}_c^2 \quad (9)$$

$$V_{PE}|_c = \int_c^u (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad (10)$$

$$V_E|_c = V_{KE}|_c + V_{PE}|_c = V_{KE}|_c \quad (11)$$

2) 在稳定情况下计算稳定裕度,提出补偿裕度的概念

为便于公式书写,改记 u 为 UEP 、 FEP 为 FEP 。以故障清除时刻的 δ_c 为暂态势能参考点,在给定故障下,如果系统能够保持稳定,列出稳定裕度的计算公式如下:

$$V = V_{cr} - V_E|_c = \int_c^{UEP} (P_m - P_e) d\delta - \frac{1}{2} M \dot{\delta}_c^2 = \int_c^{FEP} (P_m - P_e) d\delta + \int_{FEP}^{UEP} (P_m - P_e) d\delta - \frac{1}{2} M \dot{\delta}_c^2 \quad (12)$$

式中: $\int_{FEP}^{UEP} (P_m - P_e) d\delta$ 代表了临界轨迹下的减速面积,可以用 PEBS 思想,用持续故障轨迹代替临

界轨迹,沿持续故障轨迹,搜索故障清除后的暂态势能最大值 V_{PE}^{\max} ,并认为

$$V_{PE}^{\max} - (P_m - P_e) d_{cr} = V_{PE}^{\max} \quad (12)$$

定义:补偿裕度 $V_{comp} = V_{PE}^{\max} - (P_m - P_e) d_{cr}$ 。

则可以沿着系统实际故障轨迹计算出补偿裕度。

故对于给定故障,如果系统稳定,稳定裕度和相对稳定裕度的计算公式如下:

$$\text{稳定裕度} \quad V = V_{PE}^{\max} - V_{KE}|_c + V_{comp} \quad (13)$$

$$\text{相对稳定裕度} \quad RV = \frac{V}{V_{KE}|_c} \quad (14)$$

其中: V_{PE}^{\max} 也就是沿系统持续故障轨迹搜索到的故障清除后暂态势能最大值。而对于给定故障,如果系统不稳定,稳定裕度和相对稳定裕度的计算公式如下:

$$\text{稳定裕度} \quad V = V_{PE}^{\max} - V_{KE}|_c \quad (15)$$

$$\text{相对稳定裕度} \quad RV = \frac{V}{V_{KE}|_c} \quad (16)$$

其中: V_{PE}^{\max} 也就是沿系统实际故障轨迹搜索到的故障清除后暂态势能最大值。

由式(13)和图1可知,在系统稳定情况下,稳定裕度含有补偿裕度 V_{comp} 分量。如果在稳定裕度计算中忽略补偿裕度 V_{comp} ,则在稳定的情况下,稳定裕度偏小,计算结果偏于保守;而在不稳定的情况下,计算结果比较符合实际情况。

2.2 n 机系统

对于一 n 机系统,在 COI 坐标下,系统运动方程为:

$$\begin{cases} M_i \frac{d\tilde{\delta}_i}{dt} = P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} \\ \frac{d\tilde{\delta}_i}{dt} = \tilde{\omega}_i \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (17)$$

将上述 OMIB 系统的暂态能量裕度计算方法推广到 n 机系统,可以得到 n 机系统暂态能量裕度的计算方法。

1) 故障清除时刻系统的暂态能量计算如下:

$$\text{暂态动能} \quad V_{KE}|_c = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} M_i \tilde{\omega}_i^2|_c \quad (18)$$

暂态势能

$$V_{PE}|_c = \sum_{i=1}^n \int_{\tilde{\delta}_i}^{c_i} (P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COI}) d\tilde{\delta}_i = 0 \quad (19)$$

$$V_E|_c = V_{KE}|_c + V_{PE}|_c = V_{KE}|_c \quad (20)$$

2) 计算系统的持续故障轨迹,设其对应的故障

清除时间为 t_{cr} ,对应故障清除时角度为 δ_{cr} 。

3) 由时域仿真结果定性判定系统是否稳定。

4) 如果系统稳定,则基于 PEBS 思想,稳定裕度计算公式如下:

$$\text{稳定裕度} \quad V = V_{PE}^{\max} - V_{KE}|_c + V_{comp} \quad (21)$$

$$\text{相对稳定裕度} \quad RV = \frac{V}{V_{KE}|_c} \quad (22)$$

其中: V_{PE}^{\max} 也就是沿系统持续故障轨迹搜索到的故障清除后暂态势能最大值;补偿裕度 $V_{comp} = \sum_{i=1}^n \int_{\tilde{\delta}_i}^{c_i} (P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COI}) d\tilde{\delta}_i$,可以沿系统实际故障轨迹计算得到。

5) 对于给定故障,如果系统不稳定,稳定裕度和相对稳定裕度的计算公式如下:

$$\text{稳定裕度} \quad V = V_{PE}^{\max} - V_{KE}|_c \quad (23)$$

$$\text{相对稳定裕度} \quad RV = \frac{V}{V_{KE}|_c} \quad (24)$$

其中: V_{PE}^{\max} 也就是沿系统实际故障轨迹搜索到的故障清除后暂态势能最大值。

3 仿真计算

为了验证上述方法的有效性,进行了仿真计算。运用电力系统分析综合程序 PSASP5.1 版对 NES39 节点系统的故障进行时域仿真计算。在计算中,忽略了系统阻尼,所有发电机采用 E_q 恒定模型,其中 31~39 机配置了励磁调节器,31~38 机配置了调速器,31~39 机配置了 PSS,母线 3、7、15、31 上所挂负荷采用(35%恒阻抗+65%感应电动机)的复合模型,其余负荷采用恒定阻抗模型。故障发生在 26~29 线路(编号 33)50%处,三相接地短路,闪络性故障,故障持续时间 t_c 。通过改变故障时间来改变故障的严重程度。

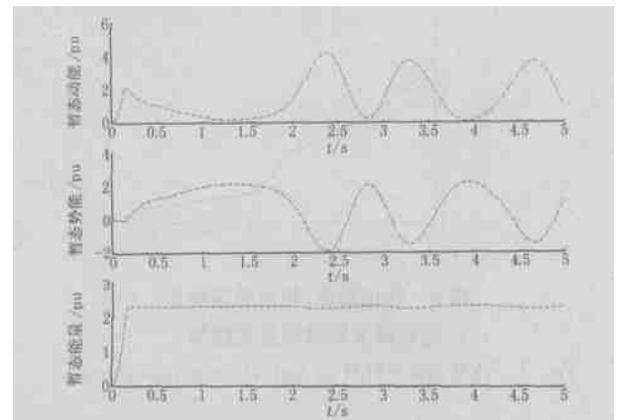


图2 暂态能量变化曲线 $t_c = t_{cr} = 0.15$ s

Fig.2 Transient energy curve $t_c = t_{cr} = 0.15$ s

由时域仿真结果可知,临界故障清除时间为 $t_{cr} = 0.15$ s。当故障清除时间 $t_c = t_{cr} = 0.15$ s 时,在 COI 坐标下系统沿故障轨迹的暂态动能、暂态势能、暂态能量如图 2 所示。

应用本文提出的方法计算系统的暂态能量裕度,作为系统的稳定裕度。对应于不同的故障清除时间,可以得到系统的稳定裕度、相对稳定裕度(Relative TEM, RTEM)随故障持续时间的变化如表 1 所示。图 3 则以曲线形式表示了系统稳定裕度、相对稳定裕度随故障清除时间的变化趋势。

表 1 系统稳定裕度随故障清除时间变化

Tab. 1 TEM as fault clearing time changing

t_c/s	V_c/pu	$\max(V_{PE}, n)/pu$	V_{comp}/pu	V/pu	RV/pu
0.10	0.973 47	1.014 97	0.155 69	1.306 65	1.342 26
0.11	1.178 29	1.218 71	0.156 20	1.102 34	0.935 55
0.12	1.401 26	1.442 07	0.150 71	0.873 88	0.623 64
0.13	1.638 52	1.687 11	0.138 92	0.624 83	0.381 34
0.14	1.896 87	1.942 03	0.120 84	0.348 40	0.183 67
0.15*	2.173 87	2.124 43	0	-0.049 44	-0.022 74
0.16	2.466 43	1.175 77	-	-1.290 66	-0.523 29
0.17	2.780 27	1.075 67	-	-1.704 60	-0.613 11
0.18	3.103 11	0.989 78	-	-2.113 34	-0.681 04
0.19	3.449 34	0.901 78	-	-2.547 56	-0.738 56
0.20	3.808 32	0.812 52	-	-2.995 80	-0.786 65

注: *为临界故障清除时间; t_c 为故障清除时间; $\max(V_{PE}, n)$ 为沿故障轨迹暂态势能最大值; V_{comp} 为补偿裕度; V 为稳定裕度; RV 为相对稳定裕度。

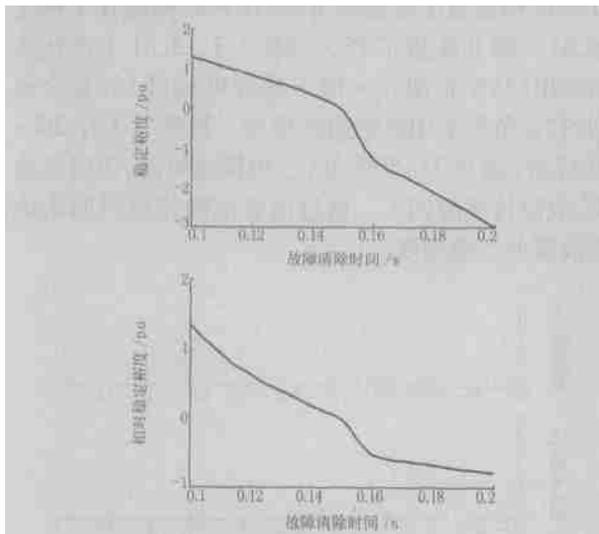


图 3 稳定裕度、相对稳定裕度随故障清除时间变化趋势

Fig. 3 TEM and RTEM as fault clearing time changing

以上结果表明,以故障清除时刻为暂态势能参考点和应用补偿裕度等概念,可以沿故障轨迹计算系统的暂态能量函数和暂态能量裕度,去掉了线性

路径假设和模型限制。进一步的研究发现实际使用上述方法对时域仿真计算软件(如电力系统分析综合程序)的输出结果进行暂态能量函数分析还需要注意以下几点:

1) 数值稳定性。沿故障轨迹计算暂态能量需要进行数值积分,在应用数值积分方法时,数值稳定性是必须考虑的问题。数值稳定性取决于传播误差。如果前面带来的误差在以后没有引起明显的进一步的误差,这种方法就是数值稳定的。另一方面,如果前面的误差引起后面更大的其它误差,这种方法就是数值不稳定的。传播误差会使得计算前几步的小误差,在后面几步被放大。

隐式梯形积分法通常具有较好的数值稳定性。仿真计算也表明,采用隐式梯形积分法,沿故障轨迹计算暂态能量函数,是数值稳定的,而采用欧拉法,则引起较大的传播误差。

2) 时域仿真软件输出结果。时域仿真软件输出结果对于计算具有重要影响,不同软件对于输出结果做了不同处理。如电力系统分析综合程序中,当功角输出超过一个很大的数,如 99999 时,PSASP 认为系统已经失稳,该功角的输出不再更新,在此后时间段功角输出均为 99999。在计算失稳故障时系统的暂态稳定裕度要做适当处理。

4 结论

取消模型限制和线性路径假设,沿实际故障轨迹计算系统的暂态能量裕度是一个极富挑战性的课题,尤其是在系统保持稳定的情况下,暂态能量裕度更加难以计算。本文提出以故障清除时刻为暂态势能参考点和补偿裕度的概念,较好地克服了存在的困难,所提计算方法经仿真计算表明是有效的。

参考文献:

- [1] Maria G A, Tang C, Kim J. Hybrid Transient Stability Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(2): 384-391.
- [2] Tang C K, Graham C E, El-Kady M, et al. Transient Stability Index from Conventional Time Domain Simulation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(3): 1524-1530.
- [3] 吕志来,张保会,哈恒旭(Lü Zhi-lai, ZHANG Bao-hui, HA Heng-xu). 基于轨迹信息的暂态稳定裕度研究(Research on Transient Stability Margin Based on Trajectory Analysis)[J]. 电力自动化设备(Electric Power Automation Equipment), 2000, 20(4): 1-3.
- [4] Fouad A A, Krumpel K C, Vittal V, et al. Transient

- Stability Program Output Analysis [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1986, 1(1): 2-9.
- [5] Haque M H. Hybrid Method of Determining the Transient Stability Margin of a Power System [J]. IEE Proc—Gener, Transm and Distrib, 1996, 143(1): 27-32.
- [6] Haque M H. Novel Method of Finding the First Swing Stability Margin of a Power System from Time Domain Simulation [J]. IEE Proc—Gener, Transm and Distrib, 1996, 143(5): 413-419.
- [7] 房大中, 周保荣, 宋文南, 等 (FANG Da-zhong, ZHOU Bao-rong, SONG Wen-nan, et al). 修正的暂态能量裕度评估策略 (Strategy for Assessment of Corrected Transient Energy Margin) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2002, 22(3): 94-98.
- [8] 薛禹胜 (XUE Yu-sheng). 运动稳定性量化理论——非自治非线性多刚体系统的稳定性分析 (Quantitative Study of General Motion Stability and an Example on Power System Stability) [M]. 南京: 江苏科学技术出版社 (Nanjing: Jiangsu Science & Technology Press), 1999.
- [9] 夏成军 (XIA Cheng-jun). 大电网在线暂态稳定分析与控制系统研究 (博士学位论文) (On-line Transient Stability Analysis & Control System of Large Scale Power Grid, Doctoral Dissertation) [D]. 武汉: 华中科技大学 (Wuhan: Huazhong University of Science & Technology), 2003.

收稿日期: 2004-01-14; 修回日期: 2004-03-30

作者简介:

夏成军(1974-), 男, 博士, 研究方向为电力系统稳定分析与控制, 电力系统实时数字仿真, HVDC与FACTS应用; E-mail: cjxia-hust@sohu.com

茹锋(1969-), 男, 博士, 副教授, 从事电力系统自动化方面的科研开发工作。

A novel transient energy margin computation method based on fault trajectory

XIA Cheng-jun^{1,2}, RU Feng¹, HU Hui-jun², HE Yang-zan²

(1. Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210036, China;

2. Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: It is of great value to compute transient energy margin (TEM) based on system fault trajectory, because there is no limit for the model of transient energy function by this method. This paper studies the problem deeply that transient potential energy cannot be calculated during some intervals along fault trajectory when linear trajectory assumption is omitted. The idea of using the fault clearing time as the reference for transient potential energy is proposed, and the conception of compensation margin is proposed also, which induces a new method of computing TEM based on fault trajectory. Simulation results indicate the validity of this method.

Key words: transient energy margin; transient energy function; fault trajectory

产品推介

CAKJ-42Z1系列多功能电力仪表

CAKJ-42Z1系列产品是一种具有可编程测量、显示、数字通讯和电能脉冲变送输出等功能的多功能智能电表, 能够完成电量测量、电能计量、数据显示、采集及传输, 可广泛应用变电站自动化、配电自动化、智能建筑、企业内部电能测量、管理、考核。测量精度为0.5级, 实现LED现场显示和远程RS-485数字接口通讯, 采用MODBUS通讯协议。



产品提供: 许昌昌安科技有限公司 电话: 0374-3321607

CAS系列电量变送器

(AS-14电流变送器, 是一种将被测电流(0-5A)转换成按线性比例输出的模拟直流电流(4-20mA)、电压信号(0-5V)。

CAS901E模块是一种智能型三相电参数数据综合采集模块; 三表法准确测量三相三线制或三相四线制交流电路中的三相电流、三相电压(真有效值)、有功功率、无功功率、功率因数、频率、正反向有功电度、正反向无功电度等电参数。

其输入为三相电压(0-500V)、三相电流(0-1000A); 输出为RS-485或RS-232接口的数字信号, 支持的通讯规约有4种: (ASCII码) 研华ADAM兼容通讯协议、十六进制LC-02协议、MODBUS-ASCII、MODBUS-RTU。

