

从几次误操作谈变压器过励磁保护原理的改进

黄莹¹, 崔静安²

(1. 西北电网有限公司, 陕西 西安 710048; 2. 西安供电局, 陕西 西安 710032)

摘要: 对近几年西北电网几次 PT 倒闸误操作引起变压器过励磁保护装置误动进行了详细的分析、探讨, 为了杜绝此类事故的再次发生, 在研究变压器过励磁特点的基础上, 提出了变压器过励磁保护原理的改进建议, 从理论上论证了其可行性。

关键词: 变压器; 过励磁保护; 电压互感器(PT)

中图分类号: TM403.5 文献标识码: B 文章编号: 1003-4897(2004)06-0055-05

0 引言

微机式变压器过励磁保护自 1999 年在西北电网投运以来, 整个西北电网先后发生了多起因操作 PT 而导致微机式过励磁保护误动作的事故, 对系统的安全稳定运行构成了一定威胁, 现将事故情况分析如下, 并在现有设备基础上, 从原理上提出了微机式过励磁保护改进建议。

1 误操作事故简述

1) 2000 年 9 月 5 日铜川 330 kV 桃曲变电站值班员操作 330 kV II 母 PT 刀闸撤运时, 拉开 330 kV II 母 PT C 相刀闸后, #1 主变微机过励磁保护动作, 跳开变压器三侧开关。

2) 2001 年 7 月 17 日, 甘肃 330 kV 眉岷变电站 II 母 PT A 相冒烟(分析为 II 母 PT 击穿过电压), 致使 #2 变过励磁保护动作, 开关跳闸。

3) 2002 年 10 月 17 日, 西安 330 kV 东郊变电站运行人员在 330 kV II 母 PT 预试完毕进行投运操作时, 该站 #2 主变过励磁保护动作跳闸。

4) 2003 年 4 月 3 日, 宁夏 330 kV 青铜峡变电站进行 PT 倒闸操作时, PT 二次过电压致使 #5 变过励磁保护动作, 开关跳闸。

2 典型事故分析

2.1 铜川 330 kV 桃曲变误操作事故

1) 事故经过

事故前, 桃曲变 #1、#2 主变正常运行, 330 kV 桃西线、桃渭线、桃桥线和桃金线运行, 330 kV 母、母 PT 分列运行(如图一)。2000 年 9 月 5 日 9:25 桃曲变值班人员操作 330 kV II 母 PT 刀闸撤运时, 拉开 330 kV II 母 PT C 相刀闸后, #1 主变微机过励

磁保护动作, 跳开变压器三侧开关。桃曲变 #1 主变保护为 WBZ-1201 微机型保护, 保护配置为“两主一后”, 包括两套主保护(二次谐波比率制动差动保护和波形对称原理的比率制动差动保护)和后备保护(主要有相间、接地阻抗保护、复合电压闭锁方向过流保护, 零序方向过流保护、过励磁保护、过负荷保护等)。

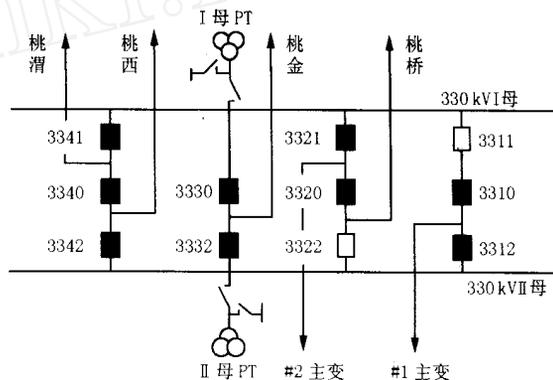


图1 铜川 330 kV 桃曲变一次系统接线示意图
Fig. 1 Primary system connection of 330 kV Taoqu substation in Tongchuan

2) 动作原因分析

值班员撤运 II 母 PT 时, 先将 I 母 PT 与 II 母 PT 并列运行, 断开 II 母 PT 二次保险后, 拉开 C 相 PT 刀闸, 此时在 II 母 PT 的开口三角绕组产生了 $3U_0 = U_a + U_b = -U_c$, 由于 PT 开口三角绕组只串接 B 相刀闸的辅助触点, 因而不能将 I 母 PT 与 II 母 PT 的开口三角绕组断开。II 母 PT 的 $3U_0$ 电压由 L630、N600 叠加到 I 母 PT 的开口三角绕组上。对于 I 母 PT 相当于在两个电压源的共同作用下, 使得其二次绕组感应的电压发生变化, B 相电压升高。从变压器保护动作时的录波数据可知: $U_a = 62.2 \sim 59.2 \text{ V}$, $U_b = 72.1 \sim 56.3 \text{ V}$, $U_c = 55.2 \sim 182.9 \text{ V}$, $3U_0 =$

59.4 - 12 V, 而过励磁保护跳闸的整定值为 $1.2 U_n$ 即 69.3 V, $T = 9$ s, U_b 已达定值, 致使主变过励磁保护动作跳闸。

2.2 西安 330 kV 东郊变误操作事故

1) 事故经过

事故前, 330 kV 东南线、3311 开关、3310 开关处于检修状态(如图 2), II 母 PT 所带负载切换至 I 母。2002 年 10 月 17 日 12:17, 运行人员在 II 母 PT 预试完毕进行投运操作时, 12:17:41 首先合上 II 母 PTA 相刀闸, 12:18:13 合上 II 母 PT B 相刀闸后, #2 主变 WBZ1201 微机过励磁保护动作, 跳开变压器三侧开关。因当时东南线 3311、3310 开关处于检修状态, #2 主变保护动作 3330、3332、1102、3502 开关跳闸, #1 主变被动失压, 造成东郊变全站失压。东郊变 #2 主变保护配置与桃曲变 #1 主变保护基本一样。

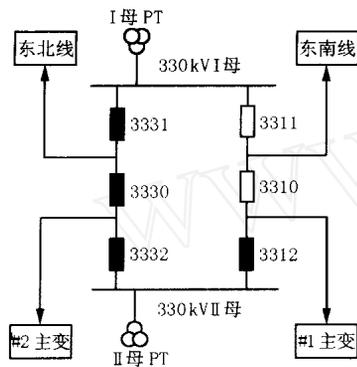


图 2 西安 330 kV 东郊变一次系统接线示意图

Fig. 2 Primary system connection of 330 kV at Dongjiao substation in Xi an

2) 动作原因分析

I 母 PT 与 II 母 PT 的星形接线二次绕组均由各相 PT 刀闸辅助触点控制, 而开口三角绕组由 A 相刀闸辅助触点控制。运行人员在 II 母 PT 恢复运行倒闸操作时, 首先合上 A 相刀闸, 此时 II 母 PT 开口三角绕组与 I 母 PT 的开口三角绕组并列。由于 II 母 PT 一次只有 A 相有电压, 处于非全相状态, 其开口三角绕组输出端电压为 A 相电压约 100 V 左右。此电压加至 I 母 PT 开口三角绕组, 这时 I 母 PT 受 330 kV I 母和开口三角 $3U_0$ 两个电源同时作用, 其二次绕组感应的电压发生变化; 12:18:13 合上 PT B 相刀闸后, 保护装置感受到的电压为 71.06 V, 达到整定值, 导致 #2 主变过励磁保护动作跳闸。

从故障录波图和保护装置的打印数据可以看出, 合上 PTA 相刀闸后, A、B 相电压升高, I 母 PT 开

口三角出现 $3U_0$; 合上 PT B 相刀闸后, B 相电压升高到额定值的 1.23 倍左右, 达到保护整定值 $1.2 U_n$, 经延时, #2 变过励磁保护动作跳开三侧开关。由于保护装置定值整定存在一定误差, #2 变保护先动, #1 变过励磁保护因 #2 变保护先动后失压没有动作。

上述两起事故共性是: 在进行类似倒闸操作时(断开或合上 PT 刀闸), 由于二次回路接线方式上存在一定缺陷和保护装置原理考虑不周, 在未按一定操作顺序进行操作的情况下, 使两组 PT 的开口三角绕组并列运行, 通过感应造成正常运行中的那组 PT 二次绕组电压升高, 达到过励磁保护定值引起保护动作。

3 过励磁保护工作原理

3.1 过励磁保护工作原理^[1,3]

变压器在运行中, 电压升高或频率降低时, 会出现过励磁。现代大型变压器采用冷轧晶粒定向硅钢片, 额定工作磁密 $B_n = 1.7 \sim 1.8$ T, 饱和磁密 $B_s = 1.9 \sim 2.0$ T, 两者之比仅为 1.1 左右, 更容易因过励磁而造成变压器的损伤。目前大型变压器都要求安装过励磁保护。变压器是由铁心和绕组组成, 设绕组外加电压为 U (V), 匝数为 W , 铁心截面为 S (m^2), 磁通密度为 B (T), 电压频率为 f (Hz), 则有: $U = 4.44 f W B S$ 。

对于给定的变压器, 式中 W 、 S 均为常数, 故可写成: $B = KU/f$ 。由于式中 $K = 1/4.44 WS$, 对于每一特定的变压器 K 为常数, 因而工作磁密 B 与 U/f 成正比, 电压升高和频率下降都将使工作磁密 B 增加, 励磁电流增大, 铁芯饱和, 造成变压器过励磁。

过励磁对变压器的损伤主要是过压过热引起的, 有一个时间积累过程。变压器允许过励磁运行的时间随过励磁倍数而不同, 美、德等国家都制定了过励磁倍数与允许运行时间关系曲线, 这类曲线具有反时限特征, 并能反映过励磁时间积累过程。

3.2 微机保护装置中过励磁保护的实现方法^[2]

以 WBZ1201 保护为例, 作为大中型变压器在过电压或低频率下运行的过励磁保护, 是采用以下判据实现的: $N = B/B_e = (U/f)/(U_e/f_e) = (U/U_e)/(f/f_e) = U_x/f_x$ 。

式中: N 为过励磁倍数, U 为变压器高压侧母线电压, f 为系统频率, U_e 为变压器高压侧母线额定电压, f_e 为系统额定频率。

本保护包括以下元件:

1) 下限定时限元件, 为过励磁保护的動作門

坎,动作判据为: $N > N_5$ (N_5 为下限定时限的定值,一般为 1.1);

2) 过励磁告警元件,动作判据为: $N > N_x$ (N_x 为过励磁告警元件的定值,一般为 1.05);

3) 反时限元件,本装置采用五段折线拟合反时限特性。过励磁保护通常需要两个起动门坎值。达到较低门坎值 ($N = 1.05$) 时,提醒运行人员调整变压器工况,避免更严重的过励磁;超过较高门坎值 ($N = 1.2$) 并达到过励磁特性曲线所允许的运行时间后动作于跳闸。

4 变压器过励磁保护原理的改进

根据以上分析,为了防止变压器过励磁保护在进行 PT 倒闸操作时误动作,除了从管理方面(如按规程在操作时停用可能误动的保护等)和完善保护二次回路两方面加以防范外,还可以从变压器过励磁保护原理上进行改进。

4.1 变压器过励磁时谐波电流的特点

现代大型变压器铁芯都采用冷轧硅钢片,其磁化特性曲线很“硬”,过电压时变压器励磁电流将激增,稳态空载电流含较多的 3 次、5 次谐波分量,一般以 5 次谐波分量表示过激磁空载电流特性。在文献 1 中,对变压器过电压的励磁电流幅值 I_0 及其谐波 I_1 、 I_3 、 I_5 、 I_7 的大小进行了试验研究和分析(如图 3),结果如下:

变压器过电压时,励磁电流中三次谐波和五次谐波电流变化显著,过电压在 115%~120% 时,三次谐波电流 I_3 和五次谐波电流 I_5 达最大值,分别为基波电流 I_1 的 80% 和 50%;当过电压更大时, I_5 又明显减小,当过电压为 140% 时, I_5/I_1 约为 35%;电压低于 105% 或高于 140% 时, $I_5/I_1 < 35%$ 。

在进行 PT 倒闸操作时,变压器本身并未真正过励磁(因为变压器的端电压与系统有关),利用此特点,可对现有微机过励磁保护原理进行改进,选用三次谐波或五次谐波作为过励磁保护的闭锁量。由于三次谐波经常大量出现在其它场合,如变压器内部短路时就有可能出现较大三次谐波成分;而五次谐波成分的大小与铁芯材料有关,与铁心结构型式无关,因而选取五次谐波为闭锁量。选取五次谐波为闭锁量的过励磁保护动作原理框图如图四所示,虚线部分为新增闭锁条件,其中 $k%$ 为 I_5 与 I_1 的比值。 I_5 和 I_1 对于微机保护可用数字滤波器直接滤出。

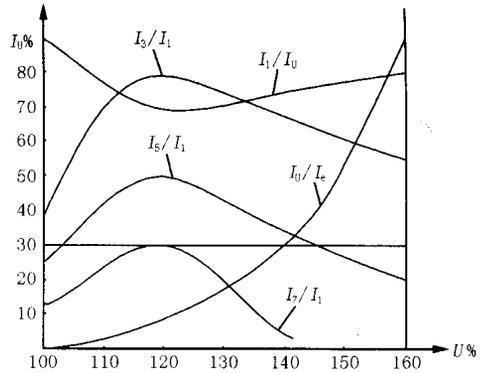


图 3 变压器过电压时励磁电流的分析

Fig. 3 Excitation current analysis of transformer overvoltage

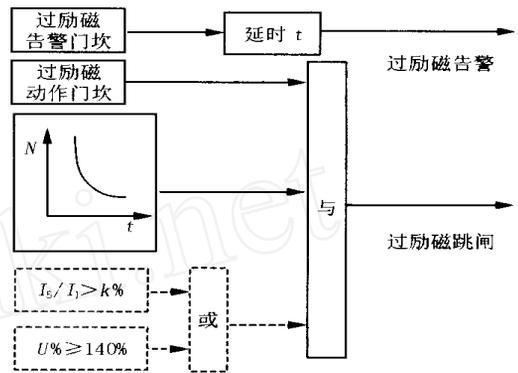


图 4 加闭锁后的过励磁保护动作原理框图

Fig. 4 Block diagram of overexcitation protection with blocking element

4.2 在进行 PT 倒闸操作时,二次绕组感应电压分析

从事故分析中可知,在进行 PT 倒闸操作时,由于操作顺序不正确,导致 I 母 PT 与 II 母 PT 的开口三角绕组并联,在二次绕组产生过电压。现对理想情况下二次绕组过电压情况分析如下, I 母 PT 与 II 母 PT 的开口三角绕组并联时等效电路如图 5 所示。由于开口三角绕组所接负载为高阻,其影响可忽略不计,三角绕组各相的等效阻抗为 Z , I、II 母 PT 各相的感应电势分别为 E_a 、 E_b 、 E_c 、 E_a 、 E_b 、 E_c

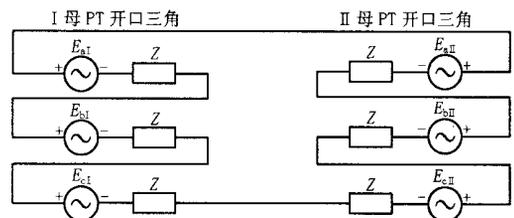


图 5 PT 开口三角绕组并联等效电路

Fig. 5 Parallel equivalent circuits of PT open delta winding

假设 I 母 PT 正常运行,此时 $E_a + E_b + E_c = 3U_0 = 0$,当 II 母 PT 加运时:

(1) 首先合上 II 母 PT A 相刀闸, 此时在 II 母 PT 的开口三角绕组产生电压 $E_a + E_b + E_c = 3U_0 = E_a = 100\text{ V}$, 加至 I 母 PT 开口三角绕组的电压为 $3U_0/2 = 50\text{ V}$, 开口三角绕组每相电压同相与 E_a 一致, 大小为 $3U_0/6 = 16.6\text{ V}$, 由于 330 kV 母线 PT 的变比为 $\frac{330}{\sqrt{3}} / \frac{0.1}{\sqrt{3}} / 0.1$, 感应到 I 母 PT 二次绕组时, 每相电压方向与 E_a 一致, 大小为 9.62 V 。根据叠加原理, 在两电压的共同作用下, I 母 PT 二次绕组感应的电压发生变化, 其大小和方向如图 6(a) 所示:

$$|E_a| = |E_a| - 9.62 = 57.7 - 9.62 = 48.08\text{ V},$$

$$E_c = E_b = [E_b^2 + (E_a / 6 / \sqrt{3})^2 - 2E_b (E_a / 6 / \sqrt{3}) \cos 120^\circ]^{\frac{1}{2}} = 63.1\text{ V}$$

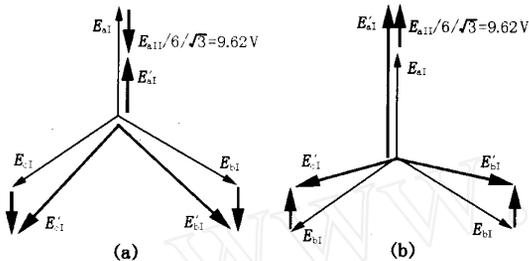


图 6 PT 二次绕组感应电压向量图

Fig. 6 Induced voltage vector graph of PT secondary winding

(2) 合上 II 母 PT B、C 相刀闸, 此时在 II 母 PT 的开口三角绕组产生 $E_a + E_b + E_c = 3U_0 = E_b + E_c = -E_a = 100\text{ V}$ 电压, 此电压加至 I 母 PT 开口三角绕组的电压为 $3U_0/2 = 50\text{ V}$, 开口三角绕组每相电压同相与 $-E_a$ 一致, 大小为 $3U_0/6 = 16.6\text{ V}$, 感应到 I 母 PT 二次绕组时, 其大小和方向如图 6(b) 所示:

$$|E_a| = |E_a| + 9.62 = 57.7 + 9.62 = 67.32\text{ V},$$

$$E_c = E_b = [E_b^2 + (E_a / 6 / \sqrt{3})^2 - 2E_b (E_a / 6 / \sqrt{3}) \cos 60^\circ]^{\frac{1}{2}} = 53.58\text{ V}$$

根据以上分析, 在进行 PT 倒闸操作过程中, 二次绕组产生的最大电压为 67.32 V , 约为 $1.17U_c$ 。

4.3 采用新原理后的动作情况分析

当选取五次谐波为闭锁量时, 取 $k\% = 30\%$ 其动作情况如下:

1) 变压器因电压变化而过励磁时动作情况分析

当 $100\% < U\% < 105\%$ 时, 变压器处于轻微过励磁状态, 一次电流中所含五次谐波分量增加, I_5/I_1

I_1 项处于临界动作状态 (见图 3), 依据定值经过延时 t (见图 4), 保护可正确给出过励磁告警信号; 当 $105\% < U\% < 140\%$ 时, 变压器处于过励磁状态, 其一次电流中所含五次谐波分量超出设定范围, 即 $I_5/I_1 > 30\%$, I_5/I_1 项开放闭锁元件, 当达到定值后能可靠动作跳闸; 当 $140\% < U\%$ 时, 变压器已处于严重过励磁状态, 尽管 $I_5/I_1 < 30\%$, 但由于 $140\% < U\%$ 和 $I_5/I_1 < 30\%$ 是或的关系, 过励磁保护可正确跳闸; 另一方面, 严重过励磁时变压器一、二次电流差增大, 变压器差动保护作为过励磁保护的后备保护也可动作跳闸。

2) 变压器因系统频率变化而过励磁时动作情况分析

对于系统中并列运行的联络变压器, 负荷过大使频率下降时, 系统中自动减负荷装置会限制其下降程度, 因而一般不会造成变压器过励磁, 即使过励磁其程度也较轻, 此时保护可正确给出信号。

对于发-变组接线方式, 发电机启动或停止过程中, 当转速偏低而电压仍维持为额定值时, 将由低频引起过励磁, 此时 U_x/f_x 可能大于动作门槛, I_5/I_1 是否大于 30% 目前没有资料可以证实; 而实际运行过程中, 发电机机端电压一般与其转速同时升降, 转速偏低而电压仍维持为额定值的情况不大可能出现, 若真出现 $U_x/f_x >$ 动作门槛, $I_5/I_1 < k\%$ ($k\% = 30\%$) 的情况, 则存在拒动的可能性, 此时应依据实际情况调节 $k\%$ 值大小或限制使用。

3) 进行 PT 倒闸操作时动作情况分析

如前所述, 当 PT 二次因操作过电压时, 变压器并未真正过励磁, 其一次电流中所含五次谐波分量极小 ($I_5/I_1 < 30\%$), 根据对 PT 倒闸操作时二次绕组感应电压的理论分析可知: 当进行 PT 倒闸操作时, 二次绕组产生的最大感应电压为 $1.17U_c$, 考虑一定的误差影响并留有一些裕度, $U\%$ 不会超过 140% , 因而采用新原理的过励磁保护不会误动。

4) $k\%$ 选取原则

$k\%$ 值的选取应保证当变压器正常运行时, 谐波闭锁元件可靠闭锁过励磁保护, 而真正过励磁时可靠开放谐波闭锁元件。

从现掌握的资料看, 目前国内有关单位和生产厂商对变压器因过压或低频引起过励磁的情况下谐波电流大小的研究尚处于起步阶段, 没有一个制造厂家和权威部门提供此方面的实验数据, 文中所提

30%的动作门槛是借鉴国外资料,是否完全适合我国还需进一步的试验和试运行经验来验证。

在实际使用 I_5/I_1 的闭锁判据时,必须结合铁芯的实际材料来考虑 $k\%$ 值的选取。由于大型变压器制造时情况千差万别,最好要求变压器提供厂商在出厂试验中提供此方面的资料,以便更合理确定此项定值。

5 结论

通过对近年来系统中发生的几起事故的详细分析,找出了进行 PT 倒闸误操作引起变压器过励磁保护误动作的直接原因;并在分析变压器过励磁特点的基础上,提出了一种可行的防止变压器过励磁保护误动作的解决方案——采用五次谐波电流闭锁的过励磁保护的新原理,并从理论上论证了新原理的可行性,其使用效果有待进一步通过实际运行进行验证。

Improvement on transformer overexcitation protection by studying several incorrect operation accidents of substation

HUANG Ying¹, CUI Jing'an²

(1. Northwest Grid Co., Ltd, Xi'an 710048, China; 2. Xi'an Power Supply Bureau Xi'an 710032, China)

Abstract: This paper gives a detailed analysis of several incorrect operations of PT in recent years, which result in maloperation of transformer overexcitation protection devices in northwest power network. To prevent similar accidents, improved scheme of transformer overexcitation protection based on its own characteristics is put forward, and its feasibility in theory is verified at last.

Key words: transformer; overexcitation protection; potential transformer(PT)

(上接第 54 页 continued from page 54)

成功率可达 100%,实时抄表成功率达 95%以上,循环补抄可达 100%,实现了设计目标,完全可以取代传统的人工抄表,节省了人力、财力,大大提高了电力营销的自动化程度,是一种切实可行的方法。

参考文献:

- [1] 戴娟,王景,朱晓峰(DAI Juan, WANG Jing, ZHU Xiaofeng). 集中抄表系统(An Aggregate Manager for Water Meter, Am Meter and Gas Meter)[J]. 电子工程师(Electronic

参考文献:

- [1] 王维俭,侯炳蕴(WANG Weir-jian, HOU Bing-yun). 大型机组继电保护理论基础(第二版)(Relay Protection Theory Foundation of Large-scale Generating Unit, Second Edition)[M]. 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press), 1989.
[2] 王维俭(WANG Weir-jian). 发电机变压器继电保护应用(Relay Protection Application of Generator and Transformer)[M]. 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press), 1998.

收稿日期: 2003-07-22

作者简介:

黄莹(1971-),女,工程师,工学硕士,主要从事电力系统继电保护方面的工作;

崔静安(1968-),男,高级工程师,工学硕士,主要从事继电保护、电力负荷管理和远程自动抄表等方面的工作。

Engineer), 2000, (7): 37-39.

- [2] 周游,高新华(ZHOU You, GAO Xin-hua). 国内几种电能表自动抄录系统之比较(Comparison of Several Automatic Kilo Watt-hour Reading System in China)[J]. 广东电力(Guangdong Electric Power), 2002(2): 55-58.

收稿日期: 2003-07-04; 修回日期: 2003-09-19

作者简介:

付丽君(1962-),女,副教授,研究方向为电力传动、电力通信;

曲宙强(1973-),男,研究生,研究方向为电力通信。

An AMR system based on power SSC communication

FU Li-jun¹, QU Zhou-qiang¹, CHENG Jie², NAN Yong-xie²

(1. Information School, Shenyang Institute of Technology, Shenyang 110168, China;

2. Liaoning Beineng Power Network Technology, Co., Ltd, Shenyang 110179, China)

Abstract: With the development of the power enterprise and the improvement of people's living standard, the manual meter reading can't satisfy the management and service of the power system. The paper introduces an AMR system based on the power SSC communication which has been employed in some place. On the basis of system structure, this paper analyses the hardware architecture, working process and functions of the four parts of the system: data assembly unit(DAU), meter reading unit(MRU), field management unit(FMU), and central processing system(CPS).

Key words: aggregated meter reading AMR system; SSC communication; SSC P200