

CVT暂态特性对工频变化量距离保护的影响

刘海洋¹, 谈顺涛¹, 许志鹏¹, 孔庆源²

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 陕西省商洛供电局, 陕西 商洛 726000)

摘要: 结合 EMTDC 仿真试验分析得知, CVT 暂态过程可能引起工频变化量距离保护超越, 且超越现象与短路电压角度和系统线路阻抗比 (S/R) 值密切相关。在此基础上提出防止超越的措施——故障后提高暂态动作门槛。其具体做法是在推导出实时计算 S/R 值的基础上, 根据 S/R 值自适应地提高动作门槛。EMTDC 仿真试验结合保护仿真程序验证了此方案的有效性。

关键词: 电容式电压互感器; 暂态误差; 工频变化量距离继电器

中图分类号: TM773 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)02-0001-05

0 引言

电容式电压互感器 (CVT) 由于造价低廉、不会发生铁磁谐振, 被广泛地应用于高压和超高压电力系统中。但与电磁式电压互感器相比, 其暂态特性较差。当系统发生故障时, 二次侧电压会发生严重的暂态过程, 因此引起的测量误差会造成常规距离保护的超越^[1-3], 已经得到研究人员的关注, 对 CVT 的暂态过程和超越解决方案做了大量的研究, 并提出相应的对策。但对于 CVT 暂态过程中的测量误差是否会影响工频变化量距离继电器的运行性能的问题, 并未引起重视。下文将结合 EMTDC 仿真进行研究, 并提出相应的对策。

1 CVT的暂态误差

CVT 主要由分压电容、补偿电抗器、中间变压器和阻尼器等部分组成^[3], 如图 1 所示。

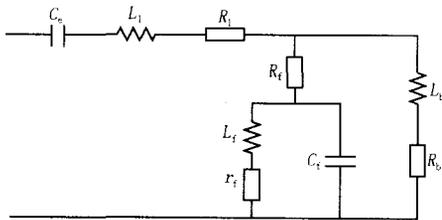


图 1 CVT 的等效电路图

Fig 1 Equivalent circuit of CVT

其中: C_e 为等效分压电容; L_1 为补偿电感和中间变压器的漏感和, R_1 为相应的电阻; R_f 、 C_f 、 L_f 和 r_f 为 CVT 的谐振型阻尼器参数; L_b 和 R_b 是负载电感和电阻。

由于 CVT 存在电感、电容等储能元件, 在发生

故障时, 其暂态响应特性较差, 输出的二次电压不能及时地反应一次侧电压的变化, 存在暂态误差。文献 [4] 推导出 CVT 的暂态误差为

$$u(t) = L^{-1} [(G(s) - 1) U(s)] \quad (1)$$

其中: $G(s)$ 为 CVT 的传递函数, $U(s)$ 为电压故障分量 u 的拉氏变换。

而电压故障分量又可以表示为

$$u = -U \sin(\omega t + \alpha) \quad (2)$$

将式 (2) 进行拉氏变换后代入式 (1), 得

$$u(t) = U \cdot L^{-1} [(G(s) - 1) \cdot \frac{\sin(\omega t) s + \cos(\omega t)}{s^2 + \omega^2}] \quad (3)$$

由式 (3) 所表达的暂态误差可以得知, 在由 CVT 内部参数 (包括 CVT 负荷) 决定的传递函数 $G(s)$ 固定下来之后, 影响暂态误差的因素是短路电压角度和电压变化量幅值 U , 而 U 与系统线路阻抗比 (S/R) 有关。

1.1 短路电压角度的影响

下面根据某实际 CVT 参数^[4]的仿真计算结果来考察 $u(t)$ 。由于 $u(t)$ 与 U 成正比, 可以设定 $U = 1$, 即相当于 CVT 高压侧安装处 0 ms 发生短路。图 2 所示为在 CVT 额定负载下, $u(t)$ 与 α 的关系。由图 2 可知, $\alpha = 0$ 时暂态分量最大, 故障前电压位于过零点时, CVT 存储的能量最大, 对保护的影响最恶劣。

1.2 系统线路阻抗比的影响

系统线路阻抗比 (S/R)——系统等效阻抗与线路阻抗之比, 对 CVT 的暂态误差影响很大。线路末端三相短路, 线路正序阻抗角与电源等效正序阻抗角相等, 则 CVT 安装处的残压为 $V = \frac{1}{1 + S/R} E$, 电压

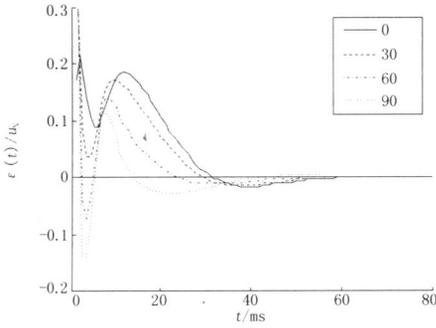


图 2 短路电压角度与 CVT电压误差的关系
Fig 2 Relation between fault inception angle and CVT voltage error

变化量为 $U = \frac{SIR}{1 + SIR} E_s$ 。而 CVT暂态分量与电压变化量成正比,相同线路相同故障,随着 SIR 的增大, CVT的暂态分量也随着变大,对保护的影响增大。

2 CVT暂态特性对工频变化量距离保护的影响

2.1 工频变化量距离保护的動作特性

工频变化量距离继电器测量工作电压的工频变化量的幅值,其动作方程为:

$$|U_{OP}| > U_Z \quad (4)$$

式中: U_Z 为整定阻抗,取故障前工作电压的记忆量。

对相间故障:

$$U_{OP\phi\phi} = U_{\phi\phi} - I_{\phi\phi} \cdot Z_{ZD} \quad (5)$$

式中: $\phi\phi = AB, BC, CA$; Z_{ZD} 为整定阻抗,一般取 $(0.8 \sim 0.85) Z_I$,下同。

对接地故障:

$$U_{OP\phi} = U_{\phi} - (I_{\phi} + K \cdot 3I_0) \times Z_{ZD} \quad (6)$$

式中: $\phi = A, B, C$; K 为线路零序电流补偿系数,

$$K = \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1}$$

对图 3 所示的距离继电器,以 A 相金属短路为例,设 $U_Z = |E_F|$ 。

$$\text{由 } E_F = - (I_A + K \cdot 3I_0) (Z_S + kZ_I) \quad (7)$$

$$U_{OP} = U_A - (I_A + K \cdot 3I_0) \times Z_{ZD} - (I_A + K \cdot 3I_0) (Z_S + Z_{ZD}) \quad (8)$$

则

$$|(I_A + K \cdot 3I_0) (Z_S + Z_{ZD})| > |(I_A + 3I_0) \cdot (Z_S + kZ_I)| \quad (9)$$

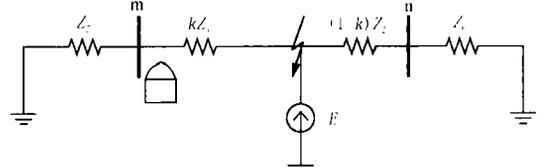
$$|Z_S + Z_{ZD}| > |Z_S + kZ_I| \quad (10)$$

可见,故障发生在保护范围外,即 $kZ_I > Z_{ZD}$,距离保护不会发生超越。但由于 CVT的暂态效应,二

次电压会滞后于一次电压的变化从而带来电压变化量计算值背离真实值,可能引发保护超越,特别是短线路或弱电源侧。



(a) 仿真系统模型图



(b) 正向三相短路系统示意图

图 3 系统等值示意图

Fig 3 System equivalent simulation network

2.2 仿真结果及分析

为验证以上问题,以 300 km、500 kV 的高压输电线路为例,利用 EMTDC 程序进行数字仿真。仿真系统如图 3 所示,线路参数为 $R_1 = 0.027 \Omega/\text{km}$, $R_0 = 0.1957 \Omega/\text{km}$, $l_1 = 0.3032 \text{ km}$, $l_0 = 0.6954 \text{ km}$, $c_1 = 4.27 \times 10^{-6} \text{ S/km}$, $c_0 = 2.88 \times 10^{-6} \text{ S/km}$, N 端的背后电源阻抗参数为 $Z_{R1} = j96.262 \Omega$, $Z_{R0} = j47.48 \Omega$, M 端的背后电源阻抗参数为 $Z_{S0} = 0.5Z_{S1}$,而 $Z_{IS} = SIR \times Z_{I1}$ 可以根据 SIR 计算出来。

取 $E_S = E_R$, S 端电源电势角超前 R 端 10° ; 40 ms 时线路末端发生 A 相金属性故障, $k = 1$, $Z_{ZD} = 0.85Z_I$ 。为研究 CVT暂态分量对工频变化量距离保护的影响,则假设电流测量值和计算值是准确的。采样获得电压的离散值,减去前一工频周波的采样值从而得到电压变化量,然后半波积分可求得幅值

U_{OP} , 得出图 4 所示的继电器暂态波形,实线波形为电压取自 CVT二次电压的计算值,虚线波形为真实电压的计算值,平行实线为动作门槛;图 4 (a)、(c)、(e) 为 $\epsilon = 0$ 时的暂态波形,图 4 (b)、(d)、(f) 为 $\epsilon = 90$ 时的暂态波形;图 4 (a)、(b) 为 $SIR = 0.5$ 时的暂态波形,图 4 (c)、(d) 为 $SIR = 3$ 时的暂态波形,图 4 (e)、(f) 为 $SIR = 10$ 时的暂态波形。

观察图 4,可以得出以下结论:

- 1) 工频变化量距离保护受到 CVT暂态误差分量的影响,有可能会超越动作。
- 2) 在电压过零点时故障, CVT暂态误差分量最大,暂态超越最严重;而在电压峰值时故障, CVT暂态误差分量最小,暂态超越发生的可能性较小。后面的研究均以电压过零时故障的最严重情况进行考虑。

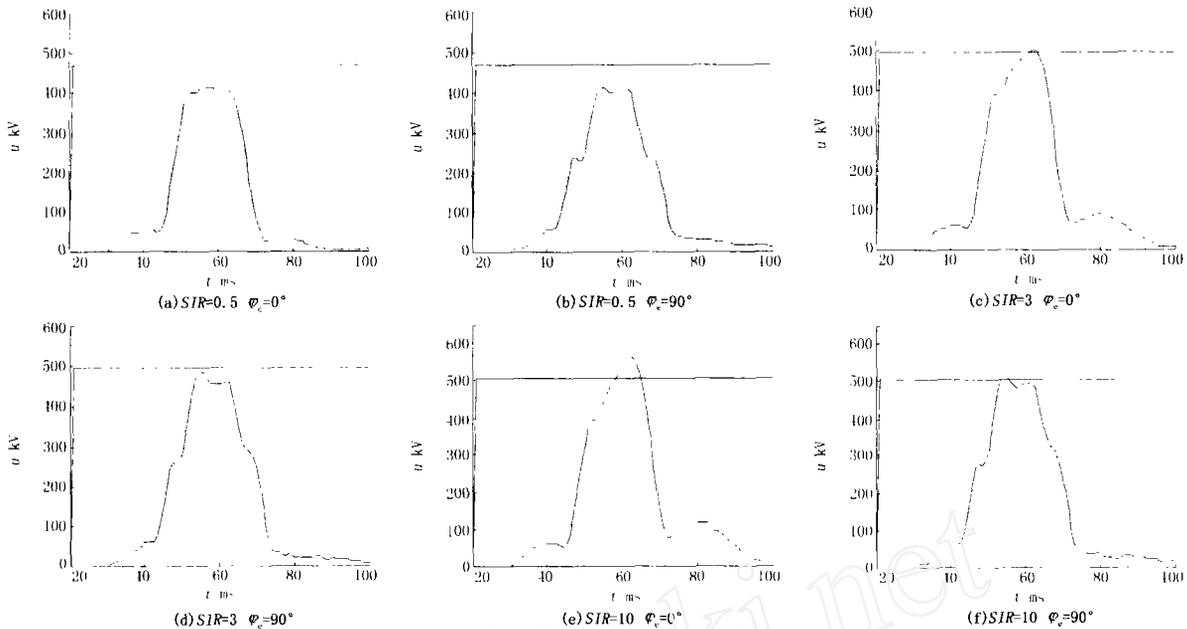


图 4 工频变化量距离继电器暂态波形图

Fig 4 Transient waveforms of incremental power frequency distance relay

(3) 随着 SIR 的增大, CVT暂态误差分量增大,越有可能发生暂态超越,当 $SIR > 3$ 就有可能发生超越,需要研究对策。

(4) 故障发生后一段时间内, CVT暂态误差分量与工频分量相位相反,起削弱作用,即在故障后一段时间内,保护不会发生超越,只有在实线波形值大于虚线波形值,保护才会发生超越。通过试验发现故障后 13 ms以内不会发生超越,如果 1 200点采样率,则故障后 16点内不会发生超越(下面以 1 200点采样率进行讨论)。

3 防止超越的对策

3.1 实时计算 SIR

对图 3所示的系统图,发生正向故障,假设系统正序阻抗与零序阻抗相等,可推得:

$$U_{\phi\phi} = - I_{\phi\phi} \cdot Z_{1S} \quad (11)$$

$$- I_{\phi\phi} \cdot Z_{2D} = - I_{\phi\phi} \cdot kZ_{1l} \quad (12)$$

$$SIR = \frac{Z_{1S}}{Z_{1l}} \frac{- k \cdot I_{\phi\phi} \cdot Z_{1S}}{- I_{\phi\phi} \cdot k \cdot Z_{1l}} = \frac{k U_{\phi\phi}}{- I_{\phi\phi} \cdot Z_{2D}} \quad (13)$$

$U_{\phi\phi}$ 和 $I_{\phi\phi}$ 从 CVT和 CT的测量值获得,通过选相元件选出故障相 $\phi\phi$,如 A相故障则为 AB、AC,然后计算故障相的 SIR ,取最大值为 SIR 。可见 SIR 的计算由于采用的是相间故障电压和相间故障电流,不受故障类型的影响,同时也不受过渡电阻的影

响,有较强的适应性。虽然 $U_{\phi\phi}$ 由于 CVT的暂态分量而存在误差,但经仿真表明,在故障后一段内暂态误差分量影响较小,在实际处理时,计算故障后 12~16点的五点 SIR 值后求取平均值作为系统实时的 SIR 值,波动在 0.8~1.3真实值之间。

3.2 提高暂态门槛防止超越

前面分析和仿真表明, CVT暂态误差分量造成了工频变化量距离继电器的超越,只要将门槛提高一定倍数就可以防止超越。以下将确定门槛提高的倍数和时间。

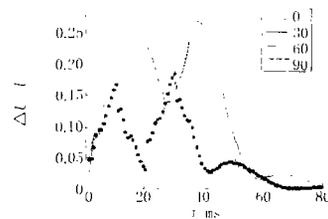


图 5 最大工频变化量误差与短路电压角度的关系

Fig 5 Relation between fault inception angle and maximal error of incremental power frequency voltage

采用图 2所示的仿真结果 (t) 来计算暂态误差可能引起的最大工频变化量误差 U ,其算法同 U_{Op} 。 U 和 ϕ 的结果如图 5,可见 $\phi = 0$ 时引起的误差最大,对保护影响最恶劣; U 在故障后两次出现峰值,第一周期的峰值会影响保护,其最大值在 $\phi = 0$ 时约为 0.25 U_N 。超越出现在线路末端故障,

$U = \frac{SIR}{1+SIR} \cdot U_N$, U 正比于 U 。考虑到暂态误差分量不可能与工频分量相位一直相同,实际取值不需要取到 $0.25U_N$,经过仿真试验,只要将门槛提高 $\frac{SIR}{1+SIR} \times 0.2U_N$ 就可以完全避免超越。而 SIR 可以通过上述方法实时计算获得,或者在运行前获得系统参数直接输入。

根据 2.2 所述的结论 (4),在故障后一段时间内,低频分量不会起助增作用,门槛为 1.0 不会有超越的危险,还能保证区内严重故障在门槛提升前尽快出口动作,经过几百次的仿真搜索发现,保护超越发生的最快时刻是故障后 17 点,因此在 17 点必须提高动作门槛防止超越。

4 仿真验证

以图 3 所示的系统,参数同前,进行 EMDC 仿

真试验,将故障输出数据代入工频变化量距离继电器仿真程序,检验上述的防超越措施,其中 SIR 是根据 3.1 节的方法实时计算出来后作为门槛抬高的依据。

仿真线路在 40 ms 时发生 A 相金属性短路, $\omega = 0$,仿真结果如图 6 所示,实线门槛为改进前门槛,点划线门槛为采用防超越措施的门槛,实线暂态波形为采用 CVT 二次电压的计算值,虚线暂态波形为采用真实电压的计算值。图 6(a)、(b) 为 $SIR = 20$ 的暂态波形,图 6(c)、(d) 为 $SIR = 10$ 的暂态波形,图 6(e)、(f) 为 $SIR = 3$ 时的暂态波形,图 6(g)、(h) 为 $SIR = 0.5$ 时的暂态波形。其中图 6(a)、(c)、(e)、(g) 依次为 $k=0.2, k=0.5, k=0.6, k=0.7$ 处故障时的暂态波形,可见随着 SIR 的减小,动作门槛可以自适应地降低,保护回缩范围减小。图 6(b)、(d)、(f)、(h) 则都为 $k=0.95$ 处故障的暂态波形,可以可靠地避免保护超越动作。

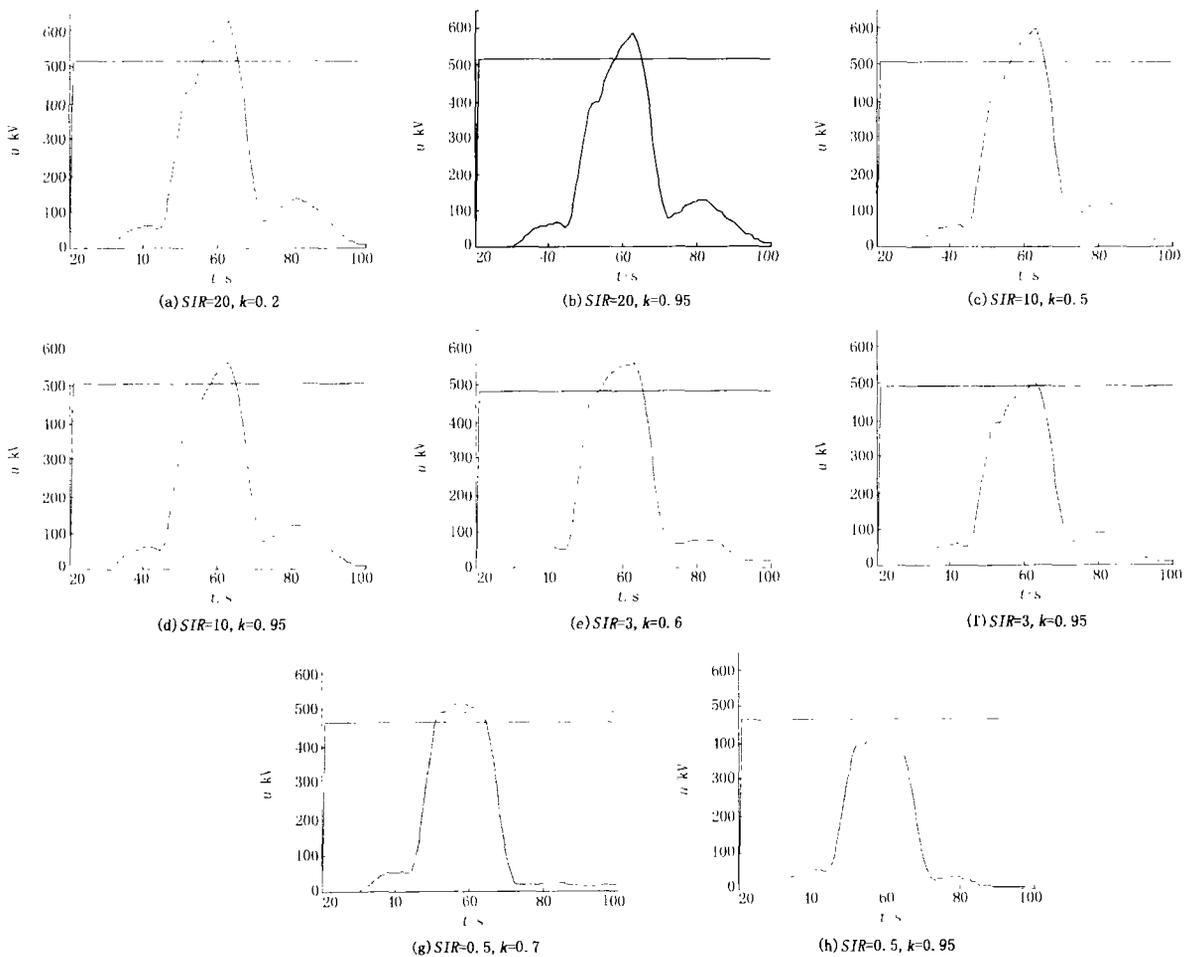


图 6 工频变化量距离继电器动作电压波形图

Fig 6 Transient waveforms of incremental power frequency distance relay

对于不同故障类型、不同故障角和不同 S/R 的条件进行了仿真,结果表明该方案对防止工频变化量距离继电器的超越是有效的,同时可以根据系统的 S/R 自适应地调整保护范围,保证区内近区故障的可靠动作。

5 结论

由于 CVT 暂态过程的影响,在 S/R 值较大时,工频变化量距离继电器有可能发生超越。论文提出了根据测量的相间电压和相间电流实时计算出 S/R 的方法,并根据 S/R 在故障后一定时间提高动作门槛值,可以有效地防止超越,并能保证严重故障在门槛提升前动作出口。该方法可以根据 S/R 值自适应地回缩保护范围,简单可靠,不影响近区故障的动作。EMTDC 试验和工频变化量距离保护仿真程序验证了上述方案的有效性。

参考文献:

- [1] HOU Da-qing, Roberts J. Capacitive Voltage Transformer. Transient Overreach Concerns and Solutions for Distance Relaying[A]. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering 1996. 119-125.
- [2] Kasztenny B, Shaples D, Asaro V, et al. Distance Relays and Capacitive Voltage Transformers—Balancing Speed and Transient Overreach[A]. 53rd Annual Conference for Protective Relay

Engineers 2000.

- [3] 施静辉,索南加乐,许庆强,等.电容式电压互感器暂态特性对距离保护影响的研究[J].西安交通大学学报,2003,37(4):415-419.
- SHI Jing-hui, SUONAN Jia-le, XU Qing-qiang, et al. Digital Simulations on Transient Response Characteristics of Capacitor Voltage Transformer and Its Influence on Distance Relays[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(4): 415-419.
- [4] 梅德冬,王文雄,何奔腾,等.电容式电压互感器暂态噪声的研究[J].继电器,2003,31(6):19-22
- MEI De-dong, WANG Wen-xiong, HE Ben-teng, et al. Research on Transient Noise of CVT[J]. Relay, 2003, 31(6): 19-22.
- [5] 李园园,郑玉平,沈国荣.串补电容对工频变化量距离保护的影响[J].电力系统自动化,2001,25(24):37-40.
- LI Yuan-yuan, ZHENG Yu-ping, SHEN Guo-rong. Influence of Series Capacitor on Incremental Power Frequency Distance Relay [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(24): 37-40.

收稿日期: 2005-06-06; 修回日期: 2005-07-19

作者简介:

刘海洋(1980-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护;E-mail: coastal_80@hotmail.com

谈顺涛(1947-),男,教授,主要从事电力系统运行与控制的科研教学工作;

许志鹏(1982-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护。

Influence of transient process of CVT on incremental power frequency distance relay

LIU Hai-yang¹, TAN Shun-tao¹, XU Zhi-peng¹, KONG Qing-yuan²

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Shangluo Power Supply Bureau, Shangluo 726000, China)

Abstract: Under analysis of the EMTDC experimental result, the conclusion is drawn that CVT transient process will make the incremental power frequency distance relay overreach which has close relation to the fault inception angle and S/R (system impedance ratio) value. Based on above research, a new method enhancing the operating threshold after fault is proposed, which prevents the relay from overreach. After deducing the S/R value through the proposed way, the threshold is enhanced by the S/R adaptively. It is verified by EMTDC program and relay simulation program.

Key words: capacitor voltage transformer(CVT); transient error; incremental power frequency distance relay

“十一五”电力设备发展规划——发电设备市场

根据我国电力需求预测,到2010年我国装机总量将达到7.1亿~7.2亿kW,这意味着,“十一五”期间我国新增装机容量的盘子在2.1亿kW左右。另据有关资料显示,目前我国发电设备企业2006年在手合同为14185万kW,2007年在手合同为6791万kW,两者相加已接近我国“十一五”电力装机总缺口。