

湖南电力系统稳定控制 规律及效果的研究

——风滩水电厂电气制动最优控制之一

毛叔钧

湖南省电力中心调度所

周剑雄

湖南省电力中心试验研究所

卢 强

王学恭 清华大学电机工程系

〔内容摘要〕

本文研究提出了按时间最优控制理论设计的微处理机电气制动控制器。控制器按状态平面的次最优开关曲线进行兵—兵 (bang—bang) 控制；该次最优开关曲线是由最优开关规律简化而得到的。同时，文中还以湖南电力系统为具体对象，研究了该新型控制器对电气制动的控制效果。计算和动态模拟实验指出，该电气制动控制装置能够有效地提高输电系统的暂态稳定极限，从而提高了系统运行的动态可靠性。它比目前采用的固定时限电气制动控制方式（以下简称“固控”）具有一系列显著的优越性。

将所研究的装置投入动态模拟系统中进行了反复试验证明，其动作是可靠的。

一、湖南电力系统的基本情况和暂态稳定问题的特点

湖南电力系统中属省电力局的部分现有装机容量约 220 万千

瓦，水电占 51.8%。电网西北部有柘溪和凤滩两大水电站，装机容量分别为 44.75 万千瓦和 40 万千瓦。其水库分别为季调节或不完全季调节性的，二者水文特性相差不大。最大的火电厂有金竹山电厂（装机容量目前为 35 万千瓦）和鲤鱼江电厂（装机容量 22.4 万千瓦），分别处于电网的西部和南部。而处于负荷中心的长沙、湘潭、株洲、湘乡、常德、衡阳等地只有四个中温中压的电厂，总装机容量仅 26.65 万千瓦。这种电源与负荷的布局，就形成了“西电东送”的特点。在电网结构上（见图 1），主网架为 220 千伏约 560 公里的大环网，其中南半环（柘溪——湘潭——株洲）为小环网，向负荷中心送电；北半环（柘溪——常德——益阳——长沙——株洲）为单线环。除柘溪水电站直接联入主环网架外，其它三个主力电厂（凤滩、金竹山、鲤鱼江）通过一回或二回 220 千伏线路与主环网相连，受端其它电厂都是接入 110 千伏或 35 千伏电网。因而，上述的电网结构薄弱、网

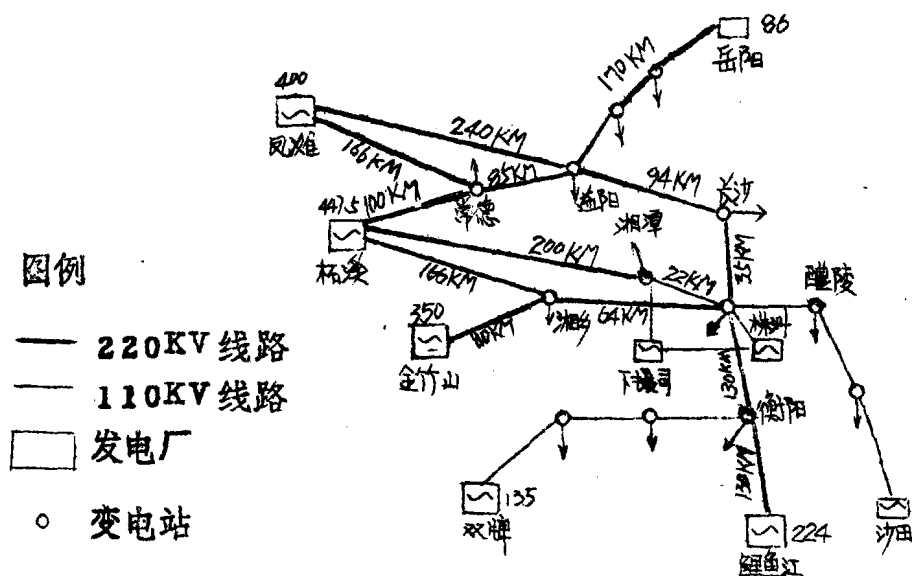


图 1 湖南电网示意图

风滩仅有风常线联络时的暂态稳定性

表 1

故障地点	计 算 条 件	稳定措施	风常线输送功率 (万千瓦)	
			24.2	28.0
风滩直接出线故障	风常线风侧 K (') , 0.2" 切两侧故障相, 1.1" 重合成功	无	1" 风滩失步	0.7" 风岳失步
		投风滩制动	稳	稳
	风沅线风侧 K ('·') , 0.2" 切除故障线路 0.8" 重合成功	无	稳	0.7" 风岳失步
		投风滩制动		稳
与风常线相邻第一级线路故障	常益线常侧 K (') , 0.2" 切两侧故障相, 1.1" 重合成功	无	稳	不 稳
		投风滩制动		稳
	常柘线柘侧 K (') , 0.2" 切两侧故障相, 1.1" 重合成功	无	稳	1.2" 风株失步
		投风滩柘溪制动		稳
与风常线相邻第二级线路故障	柘乡线柘侧 K (') , 0.2" 切两侧故障相, 1.1" 重合成功	无	稳	0.7" 柘岳失步
		投风滩柘溪制动		稳
	常德 110KU 出线 K ('·') 0.2" 切除故障线	无	稳	不 稳
		投风滩制动		稳
备 注	风滩制动功率 200MW ; 柘溪制动功率 150MW . K (') 表示单相接地短路 ; K ('·') 表示两相接地短路 (下同)			

凤滩经风常线、风益线与系统联络的暂态稳定性

表 2

故障地点	计 算 条 件	稳定措施	风常、风益输送 34.3万千瓦
凤滩电厂直接出线故障	风常线风侧 K(1); 0.2" 切两侧故障相; 0.85" 两侧重合于 K(1); 1.05" 切两侧三相。	无	1.8" 风一岳、株失步
		0.3"~0.85" 投风滩制动, 1.05" 切风二台机并切受端部分负荷	稳
与风常线相邻第一级线路故障	常柘线柘侧 K(1); 0.2" 切两侧故障相; 0.85" 两侧重合于 K(1); 1.05" 切两侧三相。	无	风一岳、株失步
		0.2"~0.75" 投柘溪制动; 1" 切柘溪二台机, 1.05" 切受端部分负荷	2.2" 风一岳、株失步
与风常线相邻第二级线路故障	柘乡线柘侧 K(1); 0.2" 切两侧故障相; 0.85" 两侧重合于故障, 1.05" 切两侧三相。	无	风一岳、株失步
		0.2"~0.75" 投柘溪制动; 1.05" 切柘溪二台机, 并切受端部分负荷	2.4" 柘一株失步 2.5" 风一株失步

架松弛及大电源均接于网架西、北两角, 而负荷分布于网架东、南两角的特点, 给电网安全稳定运行带来了极大的困难。在大发水电期间, 如不采取进一步的措施, 则环网内任何一个环节发生故障,

即使是瞬间单相接地短路亦将导致系统暂态稳定的破坏〔1〕。为了更具体地说明湖南电力系统暂态稳定问题的特点，现将1978年和1982年初的计算结果〔1〕〔2〕，摘录于表1、表2中。

由表1、表2可见：

第一，在风益线（或风常线）因故退出运行情况下，当风滩、柘溪两水电厂同时大发电时，欲使在系统一些主要的220千伏输电线路发生瞬间单相接地故障下暂态稳定不被破坏，则要求：

（1）在风常线输送功率约为242兆瓦的条件下，风滩电厂出线（包括风沅110千伏线路两相接地短路）故障时，要求迅速投入风滩电厂电气制动；

（2）在风常线输送功率280兆瓦左右时，如果柘溪电厂220千伏出线发生瞬间单相接地故障或柘溪110千伏出线发生两相接地短路故障时，除要求柘溪电厂迅速投入电气制动外，还要求风滩电厂电气制动迅速投入。

可见，在风滩电厂采用灵敏、可靠的电气制动控制措施，可以提高风常线暂态稳定极限。

第二，当风益线投产以后，若将系统暂态稳定水平从保证一些主要220千伏输电线路单相瞬间接地故障的暂态稳定性提高到保证永久性单相接地故障的暂态稳定性，从表2可知，这时同样需要在风滩、柘溪两厂采取迅速投入电气制动的措施，而且还需要在风滩、柘溪切除部分机组，同时在受端系统快速切除部分负荷。

由上所述可知，为了提高湖南电力系统暂态稳定性，要求风滩电厂电气制动及时投入的故障范围已经超越了风滩电厂直接出线的范围，要求电气制动的投入区伸入到与风常线相邻的第二级线路上。这就是湖南电力系统暂态稳定性问题的一个重要的特点。

二、制动电阻的次最优控制规律

目前我国所采用的制动电阻控制方案大致有二种：第一，采用本电站高压出线保护启动，固定时间切除；第二，按故障切除后本电站出线电流与故障前电流差值 ΔI ，起动条件为 $\Delta I \leq -K$ ($K > 0$)，按固定时间切除。显然，第一种起动方式，对于湖南电力系统而言，不能满足前述的在与凤滩电厂出线相邻一级和二级的220千伏线路上发生故障起动凤滩电气制动的要求；第二种起动方式使得线路短路过程中（此时电流增大， $\Delta I > 0$ ）制动电阻不能投入，拖延投入时间，从而严重削弱了电气制动的效果。

以上两种控制方案的共同点是电气制动投入后，持续某一固定投入时间后切除。目前国外所采用的控制规律也大都如此。这种固定投入时间的控制方式，不能适应故障地点、故障方式的变化。因此必然会出现这种情况：对于较严重的故障，制动电阻投入持续时间不足，使制动作用未能充分发挥，此即所谓“欠制动”；对于较轻的故障，制动电阻投入持续时间则又过长，致使发电机转子在振荡的第二次前冲时有可能失去同步，此即所谓“过制动”。总之，使得电气制动的效果得不到最佳的发挥。

为此，我们提出了制动电阻状态变量反馈的闭环控制方案，以实现电气制动的次最优控制 (Suboptimal Control)。设计用的数学模型中所选取的状态向量为：

$$X = \begin{bmatrix} \Delta P_e \\ \Delta f \end{bmatrix}$$

这里： ΔP_e 为发电厂输出的有功功率负变化量；

Δf 为发电机端的频率正变化量。

这就是说，投入或切除制动电阻是根据发电机的输出功率 P_e 和转速 ω （与机端频率 f 基本一致）的变化来自动确定的。当电网发生短路时，发送端的发电机组的输出功率将突然降低，同时机组转速将会上升。当发电厂的输出功率突然降低到某一数值，同时发电机转速上升到某一数值时，电气制动控制器将制动电阻投入；当转速降低到等于或小于额定转速时将制动电阻切除。

通过动态模拟试验和暂态稳定计算确定：当凤滩与系统只有一回 220 千伏线路（凤常线联络时，参见图 1），制动电阻控制规律为：

$$\text{投入制动电阻} \begin{cases} |\Delta P_{\text{凤常}}| \geq 4.0 \text{ 万千瓦}, \\ \Delta f_{\text{凤}} \geq 0.20 \text{ 赫} \end{cases}$$

切除制动电阻： $\Delta f_{\text{凤}} \leq 0$ 赫。

当凤（滩）益（阳）线投入运行后，上述投入制动电阻的功率变化规律改为：

$$|\Delta P_{\Sigma}| \geq 6.0 \text{ 万千瓦},$$

其它条件同上。这里 ΔP_{Σ} 为凤常线与凤益线有功功率偏差之和。

将以上制动规律以相平面表示（如图 2 所示）。

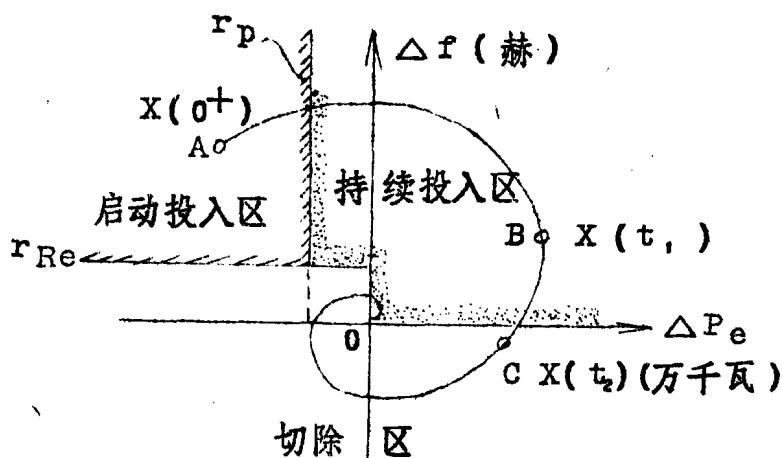


图2 风滩水电厂实际采用的电制动控制规律的相平面表示

由图2可见：

(1) $\Delta P - \Delta f$ 相平面上的曲线 r_{Re} 将相平面分为两部分。其上面部分为启动投入区及持续投入区； r_{Re} 的下面部分为制动电阻的切除区。

(2) 假如输电线上发生了短路故障，如前所述， P_e 将降低（ ΔP_e 取负值）， f 将升高（ Δf 取正值）。因此短路后的初始状态 $X(0^+)$ 必定在第二象限，如图2所示A点。则微处理机控制器将发出信号使制动电阻投入。制动电阻投入后，机组转速将会降低，同时由于短路被切除，输出功率 P_e 将不断回升，当状态由A点运动至C点（ $t = t_2$ ）时，即状态点进入到“切除区”，此时，微处理机发出“切除”信号将制动电阻切除。此后状态点将经过一段时间的自由运动而终止于坐标原点，系统又恢复到稳定的平衡状态。

以下将对这一控制规律进行必要的论证。

在建立数学模型中采用如下假设条件：

- (1) 将所研究的系统简化为单机一无穷大系统；
- (2) 发电机暂态电势 E'_q 恒定；
- (3) 忽略发电机阻尼转矩；
- (4) 不考虑调速器的影响，即假定输入机械功率不变
($\Delta P_m = 0$)；
- (5) 制动电阻功率 P_R 为一恒定值。

则可写出所研究的风滩水电厂等值发电机组的转子运动方程为：

$$\frac{H_J}{\omega_b} \Delta \dot{\delta} = -\Delta P_{\bar{e}} + \Delta P_m + P_R \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\Delta \dot{\delta} = \Delta \omega \quad \dots\dots\dots(2)$$

式中： H_J 、 ω_b 分别为机组的转动惯量（秒）及额定转速（弧度/秒）；

$\Delta \delta$ 、 $\Delta \omega$ 分别为发电机转子运行角（弧度）及转速的增量；

$\Delta P_{\bar{e}}$ 、 ΔP_m 、 P_R 分别为电站总的电磁输出功率增量，总的机械输入功率的增量和投入的制动电阻功率（标么值）。

其中输出有功功率的增量为〔4〕〔5〕：

$$\Delta P_{\bar{e}} = S_{E'} \Delta \delta \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{此处： } S_{E'} = \left. \frac{\partial P_{\bar{e}}}{\partial \delta} \right|_{E'_q = C}$$

由式(2)及式(3)可知：

$$\Delta \dot{P}_e = S_E' \Delta \omega \quad \dots\dots\dots(4)$$

由(1)-(4)式, 考虑输入机械功率不变, 即 $\Delta P_m = 0$, 于是可得下列二阶状态方程

$$\Delta \dot{P}_e = S_E' \Delta \omega \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\Delta \dot{\omega} = - \frac{\omega_0}{H_J} \Delta P_e + \frac{\omega_0}{H_J} P_R \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\text{令: } X_1 = \sqrt{\frac{H_J}{\omega_0 S_E'}} \Delta P_e; \quad X_2 = \frac{H_J}{\omega_0} \Delta \omega \text{ 代入}$$

(5)、(6)式, 写成矩阵形式有:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \beta \\ -\beta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} P_R \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$\text{此处 } \beta = \sqrt{\frac{\omega_0 S_E'}{H_J}} \quad \dots\dots\dots(8)$$

(7)式中控制量——制动功率 P_R 满足以下约束条件, 即〔注〕

$$-M \leq P_R \leq 0 \quad \dots\dots\dots(9)$$

〔注〕风滩制动功率为 20 万千瓦, 所选基准功率值为 50 万千瓦, 所以 $M = 0.4$ 。

由时间最优控制理论〔6〕可知，指标泛函为

$$J = \int_0^T 1 dt \quad \dots\dots\dots (10)$$

其相应的海米尔登函数为：

$$H = 1 + \lambda_1 \beta X_1 - \lambda_2 \beta X_2 + \lambda_2 P_R \quad \dots\dots (11)$$

因此，由庞特亚金极大值原理可知，最优控制规律 P_R^* 必须符合以下条件：

$$P_R^* = \begin{cases} -\text{Sign} |\lambda_2(t)| \\ \max |P_R| \end{cases} \quad \dots\dots\dots (12)$$

由式(12)进一步可知，最优控制量只取两种极端状态，即控制是兵—兵 (bang—bang) 型的，其控制量取以下值：

$$P_R^* = \begin{cases} -M \\ 0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (13)$$

由(7)式所示的一阶微分方程组的解为：

$$\beta X_1 = (\beta X_1(0) - P_R^*) \cos \beta t + \beta X_2(0) \sin \beta t + P_R^*$$

$$\beta X_2 = -(\beta X_1(0) - P_R^*) \sin \beta t + \beta X_2(0) \cos \beta t$$

上式中消去时间变量 t 后得：

$$(\beta X_1 - P_R^*)^2 + (\beta X_2)^2 = C^2 \quad \dots\dots (14)$$

此处 C 为常数。

将(13)式代入
(14)式, 则在相
平面 $\beta X_1 - \beta X_2$ 上
得到最优开关曲线

γ_{op} 。该曲线为位
于第二象限的以坐标
($-nm, 0$) [注]
点为圆心的一连串半
圆以及右半横轴(如
图3所示)。为了防
止电气制动误投入,
在控制规律中增加了
标么值约为 -0.12
的有功功率偏差的启
动闭锁线 γ_p (见图
3(a))。

最优开关曲线

γ_{op} 是在下述情况
作出的。

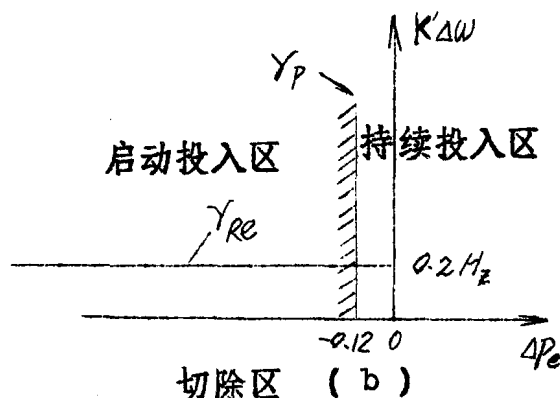
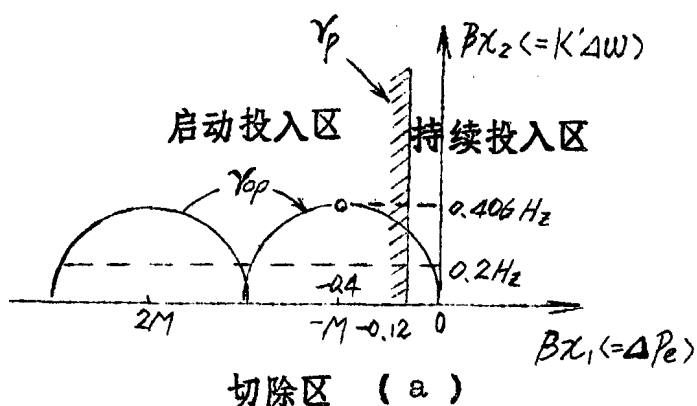


图3(a) 风滩水电厂电制动最优联曲线 γ_{op}

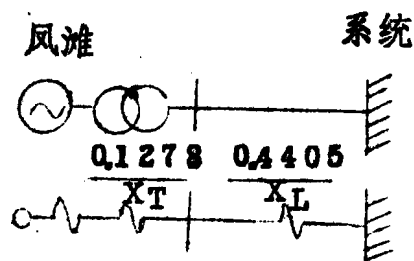
(b) 风滩水电厂电制动实际开关曲线 γ_{re}

(1) 设计计算用的等值网络及其参数如图4所示。

(2) 风滩电厂为最大开机方式(四台机): $\delta_0 = 60^\circ$, 制动
电阻功率 $P_R = 20$ 万千瓦, 即 $M = 0.4$ 标么。由上述参数求得
 $S_E' = 0.77879$,

[注]: $n = 1, 2, \dots$

$$K' = \sqrt{\frac{H_J}{\omega_0}} S'_E = 0.15685 ,$$



$$H_J = 9.92 \text{ 秒}$$

$$X'_d = 0.3748$$

$$X_q = 0.61253$$

与图3中最优开关曲线 γ_{op} 的顶点A相对应的频率变化偏差为

$$\Delta f = \frac{0.4}{2\pi K'} = 0.406 \text{ (赫)}$$

图(3)b中标出了实际采用的开关曲线 γ_{Re} ，该开关曲线与图2所示是一致的。

比较图3(a)与图3(b)可见，所采用的实际电气制动开关曲线 γ_{Re} 是将最优开关曲线 γ_{op} 加以一定的简化而得到的。这种简化只是将 γ_{op} 曲线在第二象限内的半圆改为水平线。即使得在 Δf 大于0.2赫(该值由动模试验所确定的)及 $\Delta P_e \leq -0.12$ 标么条件下启动以投入制动电阻。由此可知，实际所采用的控制规律是一种近似于最优控制规律的次最优控制。

三、风滩电气制动按次最优控制规律设计的闭环控制对提高系统稳定性效果的试验研究

对所提出的具有微处理器控制器的电气制动次最优控制方案(3)(7)在动态模拟系统上进行了实验研究。

为有利于研究在风滩投、切制动电阻对系统稳定的影响，在动态模拟实验研究中，将湖南电力系统简化成为一个三机、二负荷的

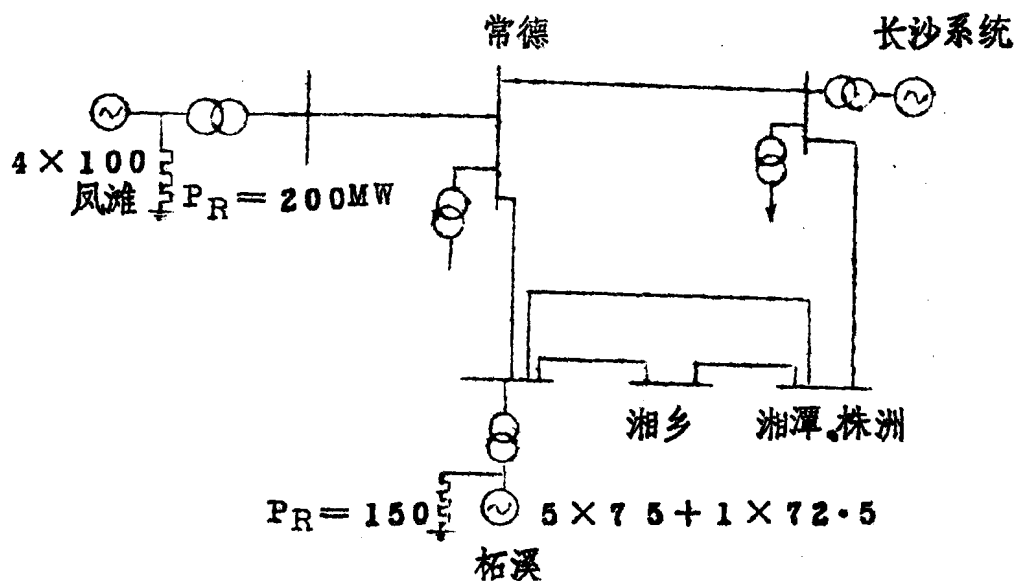


图5 湖南电力系统模拟系统结线

等值系统，即保留了风滩、柘溪两个等值机，将受端系统的各机组合并成为“长沙”等值机。其模拟系统结线如图5所示。

1. 风常线静态稳定极限实验

风常线静态稳定极限实验结果如表3表示。

表3 各种可能结线下风常线静态稳定极限

实 验 条 件		风常线静 稳 极 限 (万千瓦)	备 注
结线方式	柘溪出力 (万千瓦)		
合 环 运 行	48.3	39 - 40	计算值为42万千瓦
常 益 线 断 开	46.0	32.0	
柘 乡 线 断 开	30.5	37.0	
柘常、柘潭线断开	25.0	38.0	
柘 常 线 断 开	35.0	39.0	

由表 3 可知，在系统可能采取的各种结线方式下，风常线的静态稳定极限在 3 2 万千瓦至 4 0 万千瓦之间。该值将大于风常线的暂态稳定极限（见表 4）。由此可得出结论，为了提高风滩水电厂输送功率的最大允许值，主要应提高其暂态稳定极限值。因此采用电气制动的最优控制技术以提高系统的暂态稳定性是十分必要的。

2. 风常线暂态稳定极限试验

动态模拟系统试验中求得的无制动措施、具有固定时间的制动措施以及具有微处理机控制器的最优控制电气制动措施三种情况下的暂态稳定极限值列于表 4 中。

由表 4 可见：由于采用风常线继电保护动作起动的定时限控制措施（即“固控”），使得在风常线以外的其它 2 2 0 千伏线路上发生单相故障时，风滩制动电阻不能投入。这种情况下风常线的暂态稳定极限只有 2 4 万千瓦，这就限制了风常线的输送功率极限。采用本文提出的状态量反馈的微处理机控制方案，则无论何处短路，只要风滩电厂的状态点进入相平面的“启动投入区”（见图 3），制动电阻均可投入，且在最优时刻自动切除。这样就使得风常线的输送功率极限由上述的 2 4 万千瓦提高至 2 8 万千瓦。由此可见，制动电阻最优控制方案的经济效果是很明显的，它至少可将风常线的实际输送功率极限提高 4 万千瓦。按此计算，每年丰水期可多发电约一亿度。此外，实验还表明，该措施对更严重的短路故障下的稳定极限的提高将更为显著。例如在常益线益阳侧发生两相接地短路的情况下，最优电气制动措施，可将风常线暂态稳定极限由 1 5 万千瓦提高至 2 3 万千瓦。这对于提高系统暂态可靠性是很有意义的。

表 4

风常线暂态稳定极限实验值

故障线路	故障地点 与类型	实 验 条 件	风常线暂稳极限 (万千瓦)				优控效果 (万千瓦)	
			无措施	固控	优 控	比无措施 提 高	实际提高	
风 常 线	风侧K (')	0.2"切两侧单相; 1.1"重合, 风滩固控	24.0	29.0	28.0~29.0	4.0~5.0	0	
	常侧K (')	0.26"~0.8"制动 功率200MW	23.0	28.0	26.0	3.0	-2.0*	
	柘侧K (')	0.2"切两侧单相; 1.1"重合; 0.2"~ 0.8"柘溪制动150MW	24.0	不能夠 投入	29.0	5.0	5.0	
柘 乡 线	乡侧K (')		29.0	不能夠 投入	29.0	0	0	
	常侧K (')	0.2"切两侧单相; 1.1"重合	28.0	不能夠 投入	34.0	6.0	6.0	
常 益 线	益侧K (')		30.0	不能夠 投入	34.0	4.0	4.0	
	益侧K (")	0.2"切两侧三相; 不重合	15.0	不能夠 投入	23.0	8.0	8.0	

续上表

柘	柘側 K (°)	0.2" 切兩側單相, 1.1" 重合; 0.2"~0.8" 投柘溪電制 150 MW	26.0	不能夠投入	28.0	2.0	2.0
	柘側 K (°)	0.2" 切兩側三相, 不能夠投入 重合; 0.2"~0.8" 投柘溪制動 150 MW	24.0	不能夠投入	24.0	0	0
	常側 K (°)	0.2" 切兩側三相, 不能夠投入 重合; 0.2"~0.8" 投柘溪制動 150 MW	24.0	不能夠投入	28.0	4.0	4.0
線	常側 K (°)	0.2" 切兩側三相, 1.1" 重合; 0.2"~0.8" 投柘溪制動 150 MW	25.0	不能夠投入	27.0	2.0	2.0
	常側 K (°)	0.2" 切兩側單相, 1.1" 重合; 0.2"~0.8" 投柘溪制動 150 MW	28.0	不能夠投入	33.0	5.0	5.0
	變壓器內部 K (°)	0.2" 切變壓器及變壓器負荷 13 萬千瓦, 不能夠投入 重合	30.0	不能夠投入	30.0	0	0