



## (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103603767 B

(45) 授权公告日 2016. 03. 30

(21) 申请号 201310426365. 6

EP 1746285 A3, 2012. 09. 05,

(22) 申请日 2013. 09. 18

JP 4998885 B2, 2012. 08. 15,

(73) 专利权人 国家电网公司

地址 100031 北京市西城区西长安街 86 号

专利权人 国网天津市电力公司

潘庭龙等. 风电系统滑模极值搜索 MPPT 控制方法研究. 《太阳能学报》. 2012, 第 33 卷 (第 12 期),

审查员 王羽波

(72) 发明人 刘涛 李晓辉 杜明 王旭东  
韩磊

(74) 专利代理机构 天津盛理知识产权代理有限公司 12209

代理人 王来佳

(51) Int. Cl.

F03D 7/00(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 102072083 A, 2011. 05. 25,

CN 101639038 A, 2010. 02. 03,

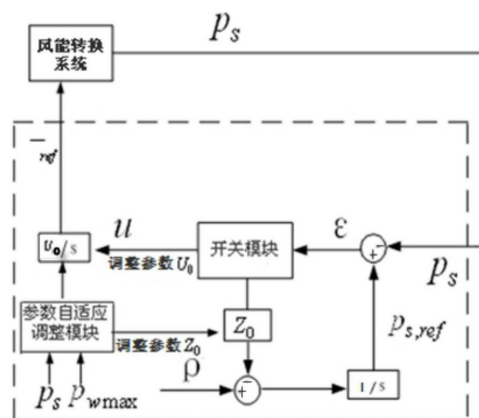
权利要求书1页 说明书4页 附图3页

## (54) 发明名称

一种基于滑模的极值搜索控制参数自适应调整方法

## (57) 摘要

本发明涉及一种基于滑模的极值搜索控制参数自适应调整方法, 包括步骤有: (1) 每隔采样周期  $\Delta t$ , 从发电机输出端采集  $t$  时刻 (当前时刻) 的实际输出功率  $p_s(t)$ , 从风速测量装置得到当前风速; (2) 导出当前风速下的最佳转速; (3) 计算调整系数  $\gamma$ ; (4) 基于滑模的极值搜索控制的参数调整, 如果  $|p_s(t) - p_{wmax}(t)| > \xi$ ,  $\xi$  为小槛值, 则令  $Z_0 = Z_0 \times \gamma$ 、 $U_0 = U_0 \times \gamma$ ; 否则, 保持  $Z_0$ 、 $U_0$  不变,  $t = t + \Delta t$  并转到第②步; (5) 控制系统通过滑模运动快速调整发电机转速  $\omega_r$  到其最佳转速  $\omega_{ref}$ ; (6) 使输出的功率曲线最接近最佳功率曲线。本发明根据当前风速环境自动调整控制系统参数, 使输出的功率曲线更加接近最佳曲线, 使风能利用系数  $C_p$  恢复到最大值。



1. 一种基于滑模的极值搜索控制参数自适应调整方法,其特征包括步骤如下:

(1) 每隔采样周期  $\Delta t$ ,从发电机输出端采集当前  $t$  时刻的实际输出功率  $p_s(t)$ ,从风速测量装置得到当前风速;

(2) 导出当前风速下的最佳转速;

(3) 计算调整系数  $\gamma$ ;计算调整系数  $\gamma$  所采用的公式为:根据式  $\gamma = \frac{|p_{w\max}(t) - p_{w\max}(t - \Delta t)|}{|p_s(t) - p_s(t - \Delta t)|}$  计算调整系数  $\gamma$ ;

(4) 基于滑模的极值搜索控制的参数调整,如果  $|p_s(t) - p_{w\max}(t)| > \xi$ ,  $\xi$  为小槛值,则令  $Z_0 = Z_0 \times \gamma$ 、 $U_0 = U_0 \times \gamma$ ;否则,保持  $Z_0$ 、 $U_0$  不变,  $t = t + \Delta t$  并转到第 (2) 步;

(5) 当  $p_s(t) = p_{w\max}(t)$  时,基于滑模的极值搜索控制结构中的参数  $Z_0$ 、 $U_0$  为该控制系统的最佳参数,控制系统通过滑模运动快速调整发电机转速  $\omega_r$  到其最佳转速  $\omega_{ref}$ ;

(6) 通过风能转换系统,运行在最佳转速  $\omega_{ref}$  的风电机组输出当前风速下的最大功率  $p_{w\max}$ ,通过参数调整,最终获得一组最佳参数,使输出的功率曲线最接近最佳功率曲线。

2. 根据权利要求 1 所述的基于滑模的极值搜索控制参数自适应调整方法,其特征在于:所述步骤 (2) 导出当前风速下的最佳转速的具体方法为:风能利用率  $C_p$  取最大值 0.475,根据式  $P_{w\max} = \frac{1}{2} \rho S C_{p\max} v^3$  计算出  $t$  时刻风速  $v$  下的最大功率  $p_{w\max}(t)$ ,最大功率对应的转速为当前风速下的最佳转速  $\omega_{ref}$ 。

## 一种基于滑模的极值搜索控制参数自适应调整方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于双馈型变速恒频风力发电系统技术领域,尤其是一种基于滑模的极值搜索控制参数自适应调整方法。

### 背景技术

[0002] 近十年来风力发电技术在世界范围内取得了迅猛发展,风电系统单机功率由上世纪 90 年代的几千 W 增大到了目前的 5-6MW。如何在有效的风速范围内最大限度提高风能的利用率而提高风电场的工作效率,即风电系统最大风能追踪和调节问题,一直是风电场出力调节和控制的一个热点问题。

[0003] 有关风电系统最大风能追踪问题,国内外研究人员提出了众多有意义的算法及策略。采用最佳叶尖速比法来实现最大风能追踪,该方法控制原理简单,但需要对风速进行实时精确的测量,降低了控制的精确度。采用所谓的爬山法实现机组最大风能追踪,但该方法的缺点是控制器的精度尚有待进一步提高。将 WRBFN 神经网络与爬山算法相结合来解决爬山算法控制精度不够高的缺点,但还只能适用于直驱永磁式变速恒频风电系统。基于仿真试验获得与既定风速曲线相对应的最佳出力曲线的所谓功率反馈法以实现最大风能追踪控制,由于风速曲线是随机变化的,如何对于变化非常复杂的不同的风速曲线而快速地获得有代表性的最佳功率风速控制曲线是该方法需要克服的难点。基于滑模变结构控制策略的最佳风能追踪方法,该方法具有无差跟踪及响应速度快的特点,但其缺点是在最大功率点附近可能会产生振荡。基于模糊控制策略的最大风能追踪策略,该方法的最大优点是无需对被控对象进行精确建模,但控制器控制精度相对较低。基于摄动极值搜索的风电最大出力追踪方法,该方法也无需对控制对象建立精确的模型,但由于需额外引入激励信号及高通滤波器,一方面降低了控制的反应速度,另一方面也增加了控制系统的复杂性。基于滑模的极值搜索控制,该控制方法不但不需控制对象的数学模型,而且控制原理简单,控制效果好,缺点是该控制方法存在三个参数,如果参数设置不当会大大降低控制的品质,而传统方法是采用仿真的方法,进行反复地人为参数调整,而得到具有比较好的控制品质的参数,当系统结构发生变化时,又要进行相应的调整,因此非常繁琐。可以看出,当前对于风电最大风能追踪控制方法各有优点,但也均存在一定问题。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的在于克服现有技术的不足,提供一种基于滑模的极值搜索控制参数自适应调整方法,该方法能根据双馈型变速恒频风电机组的控制结构及当前的风速环境自动调整基于滑模的极值搜索控制 (SM-ESC) 的  $\rho$ 、 $Z_0$ 、 $U_0$  三个参数,从而使 SM-ESC 的控制品质保持最佳,最终达到提高风能利用率、实现风电系统的最大风能追踪的目的。。

[0005] 本发明解决其技术问题是采取以下技术方案实现的:

[0006] 一种基于滑模的极值搜索控制参数自适应调整方法,包括步骤如下:

[0007] (1) 每隔采样周期  $\Delta t$ ,从发电机输出端采集  $t$  时刻(当前时刻)的实际输出功率

$p_s(t)$ , 从风速测量装置得到当前风速;

[0008] (2) 导出当前风速下的最佳转速;

[0009] (3) 计算调整系数  $\gamma$ ;

[0010] (4) 基于滑模的极值搜索控制的参数调整, 如果  $|p_s(t) - p_{wmax}(t)| > \xi$ ,  $\xi$  为小槛值, 则令  $Z_0 = Z_0 \times \gamma$ 、 $U_0 = U_0 \times \gamma$ ; 否则, 保持  $Z_0$ 、 $U_0$  不变,  $t = t + \Delta t$  并转到第②步;

[0011] (5) 当  $p_s(t) = p_{wmax}(t)$  时, 基于滑模的极值搜索控制结构中的参数  $Z_0$ 、 $U_0$  为该控制系统的最佳参数, 控制系统通过滑模运动快速调整发电机转速  $\omega_r$  到其最佳转速  $\omega_{ref}$ ;

[0012] (6) 通过风能转换系统, 运行在最佳转速  $\omega_{ref}$  的风电机组输出当前风速下的最大功率  $p_{wmax}$ , 通过参数调整, 最终获得一组最佳参数, 使输出的功率曲线最接近最佳功率曲线。

[0013] 而且, 所述步骤(2) 导出当前风速下的最佳转速的具体方法为: 风能利用率  $C_p$  取最大值 0.475, 根据式  $P_{wmax} = \frac{1}{2} \rho S C_{pmax} v^3$  计算出  $t$  时刻风速  $v$  下的最大功率  $p_{wmax}(t)$ , 最大功率对应的转速为当前风速下的最佳转速  $\omega_{ref}$ 。

[0014] 而且, 所述步骤(3) 计算调整系数  $\gamma$  所采用的公式为: 根据式  $\gamma = \frac{|p_{wmax}(t) - p_{wmax}(t - \Delta t)|}{|p_s(t) - p_s(t - \Delta t)|}$  计算调整系数  $\gamma$ 。

[0015] 本发明的优点和积极效果是:

[0016] 本发明对基于滑模的极值搜索控制进行改进, 增加了参数自适应调整模块, 应用于双馈型变速恒频风力发电系统中, 能够根据当前风速环境自动调整控制系统参数, 使控制品质最佳, 进而使输出的功率曲线更加接近最佳曲线; 在最大风能追踪效果上风速变化后能迅速调整转速保持叶尖速比  $\lambda$  为其最佳值, 使风能利用系数  $C_p$  恢复到最大值。

## 附图说明

[0017] 图 1 基于滑模的极值搜索控制应用到风电中的结构框图;

[0018] 图 2 基于滑模的极值搜索控制的双馈发电机转子侧 PWM 的控制策略框图;

[0019] 图 3 有参数自适应调整与无参数调整所得的风电最佳出力曲线对比图;

[0020] 图 4 增加参数自适应调整的基于滑模极值搜索控制结构框图;

[0021] 图 5 为本发明效果验证时使用的风速模型;

[0022] 图 6 本专利方法与未进行参数自适应调整 SM-ESC、最佳叶尖速比法以及基于摄动的 ESC 法  $\omega_r$  的对比效果;

[0023] 图 7 本专利方法与未进行参数自适应调整 SM-ESC、最佳叶尖速比法以及基于摄动的 ESC 法  $p_s$  对比效果图。

## 具体实施方式

[0024] 以下结合附图对本发明实施例做进一步详述, 需要强调的是, 以下实施方式是说明性的, 而不是限定性的, 不能以此实施方式作为对本发明的限定。

[0025] 一种基于滑模的极值搜索控制参数自适应调整方法, 该系统包括: 含参数自适应调整模块的基于滑模的极值搜索控制系统, 该系统输出一个发电机最佳转速参考值  $\omega_{ref}$ ,

风能转换系统通过跟踪该转速参考值来输出最大功率,输出的功率再反馈到含参数自适应调整模块的基于滑模的极值搜索控制系统中,这样一个反馈系统就能保证风电系统随时调整其转速从而使输出的功率最大化。

[0026] 步骤如下:

[0027] (1) 每隔采样周期  $\Delta t$ , 从发电机输出端采集  $t$  时刻(当前时刻)的实际输出功率  $p_s(t)$ , 从风速测量装置得到当前风速; 风能利用率  $C_p$  取最大值 0.475, 根据式  $P_{w\max} = \frac{1}{2} \rho S C_{p\max} v^3$  计算出  $t$  时刻风速  $v$  下的最大功率  $p_{w\max}(t)$ , 如图 1 所示, 最大功率对应的转速为当前风速下的最佳转速  $\omega_{ref}$ ;

[0028] (2) 根据式  $\gamma = \frac{|p_{w\max}(t) - p_{w\max}(t - \Delta t)|}{|p_s(t) - p_s(t - \Delta t)|}$  计算调整系数  $\gamma$ ;

[0029] (3) 如图 2 所示, 基于滑模的极值搜索控制的参数调整模块, 如果  $|p_s(t) - p_{w\max}(t)| > \xi$ ,  $\xi$  为比较小的槛值, 则令  $Z_0 = Z_0 \times \gamma$ 、 $U_0 = U_0 \times \gamma$ ; 否则, 则保持  $Z_0$ 、 $U_0$  不变。  $t = t + \Delta t$  并转到第②步;

[0030] (4) 当  $p_s(t) = p_{w\max}(t)$  时, 基于滑模的极值搜索控制结构中的参数  $Z_0$ 、 $U_0$  为该控制系统的最佳参数, 控制系统能通过滑模运动快速调整发电机转速  $\omega_r$  到其最佳转速  $\omega_{ref}$ ;

[0031] (5) 通过风能转换系统, 运行在最佳转速  $\omega_{ref}$  的风电机组输出当前风速下的最大功率  $p_{w\max}$ , 如图 3 所示, 通过参数调整, 最终获得一组最佳参数, 使输出的功率曲线最接近最佳功率曲线。

[0032] 为了验证上述改进后的基于滑模的极值搜索控制方法在最大风能追踪和机械转矩控制上的效果, 本专利在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建了变速恒频风电机组的控制模型, 采用的双馈电机参数如表 1 所示, 风轮机组的参数如表 2 所示。

[0033] 表 1 双馈异步发电机参数

[0034]

额定容量	额定电压为 1	频率
5MVA	10KV	50HZ

[0035] 表 2 风轮机组参数

风 轮 半径 R	空气密度 $\rho$	最佳叶尖速比 $\lambda_{opt}$	最大风能利用系数 $C_{p\max}$
40m	1.225 $Kg/m^3$	7	0.475

[0037] 初始参数  $\rho$ 、 $Z_0$ 、 $U_0$  分别为: 0.015、1.125、0.077;  $\Delta t$  取 0.1s。图 4 所示是仿真所用的平均值为 8m/s 的随机风速曲线, 持续时间为 3000 秒; 图 5 是叶尖速比  $\lambda$  和风能利用系数  $C_p$  的变化曲线。从图 5 可以看出,  $\lambda$  在最佳值 7 附近波动,  $C_p$  则在最大值 0.475 及以下波动, 波动范围不大, 并且减小后能迅速恢复到最大值, 说明采用本文控制策略之后能保证风力机大多数情况下运行在  $\lambda_{opt}$  和  $C_{p\max}$  附近, 实现了最大风能追踪目的。

[0038] 为了更直观地观察基于滑模的极值搜索控制进行最大风能追踪的控制效果,本专利分别搭建了最佳叶尖速比法和基于摄动的极值搜索法的模型与基于滑模的极值搜索空控制进行比较,当风速由 9m/s 突然增大到 10m/s 时,三种方法的转子转速  $\omega_r$  和定子输出有功功率  $p_s$  的变化情况如附图 6 和附图 7,可以看出基于滑模的极值搜索控制比另外两种方法更加接近最佳曲线,因此采用改进后的极值搜索法不仅在控制原理上有优势(该方法唯一需要的输入变量是发电机输出的有功功率,这就避免了许多传统方法存在的复杂问题,比如风速的快速准确测量、对风轮机模型和参数的要求以及需要梯度传感器等),在控制效果上也较其他方法好。

[0039] 综上所述,本发明专利对基于滑模的极值搜索控制进行改进,增加了参数自适应调整模块,应用到双馈型变速恒频风电机组中,使 SM-ESC 的控制品质保持最佳,最终达到提高风能利用率、实现风电系统的最大风能追踪的目的。

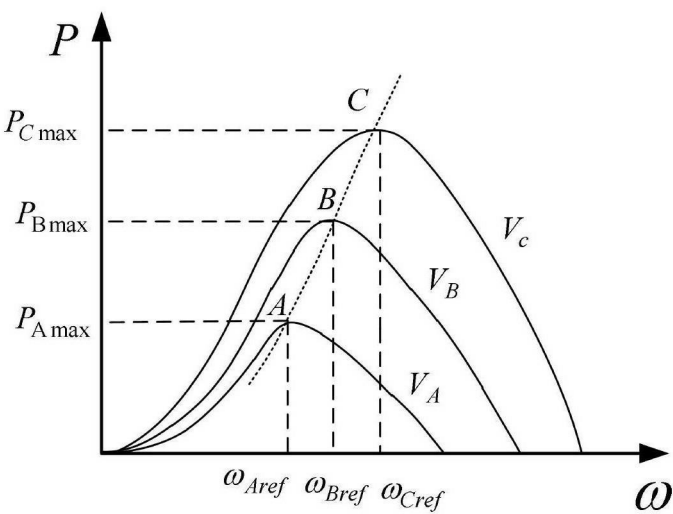


图 1

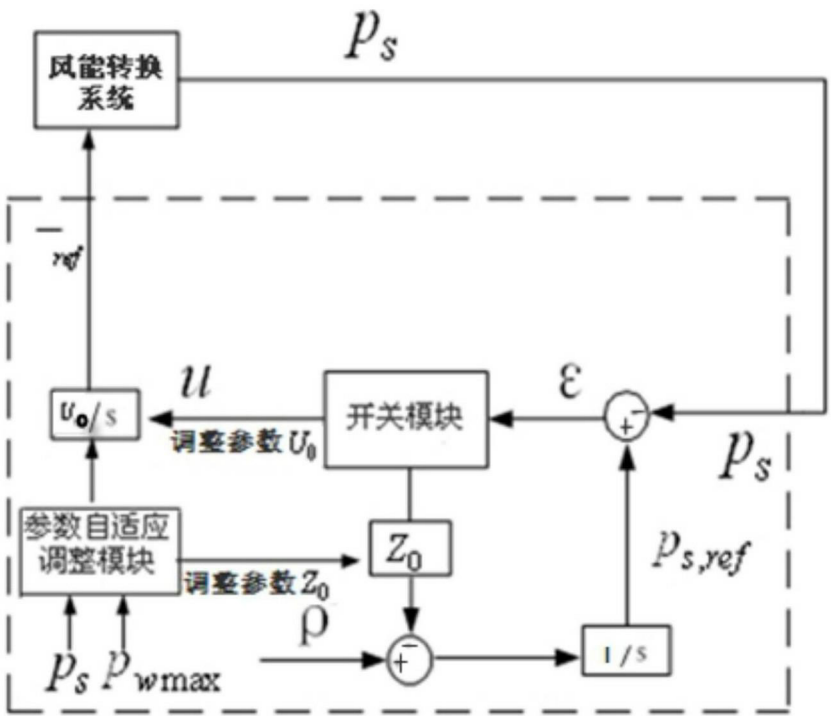


图 2

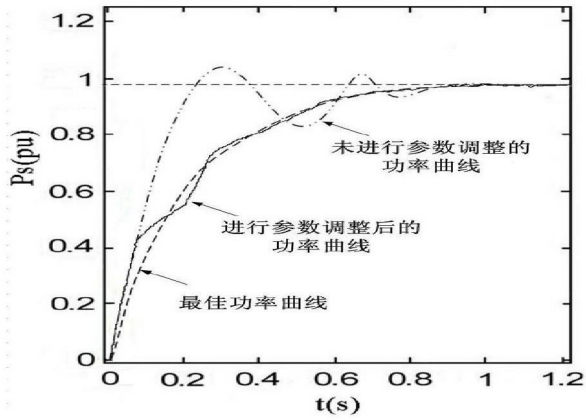


图 3

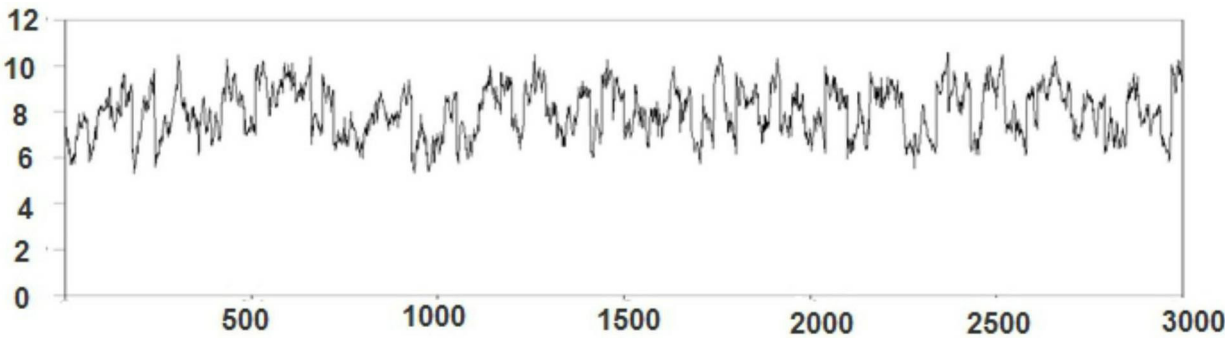


图 4

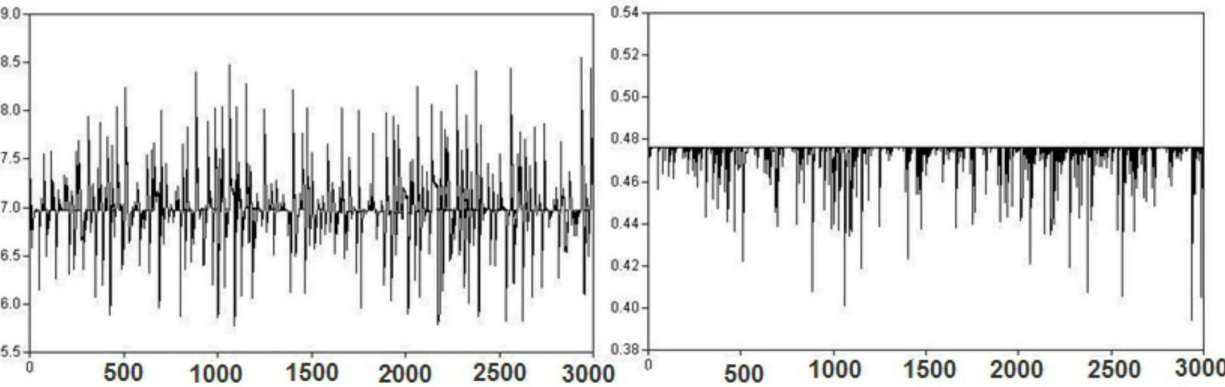


图 5

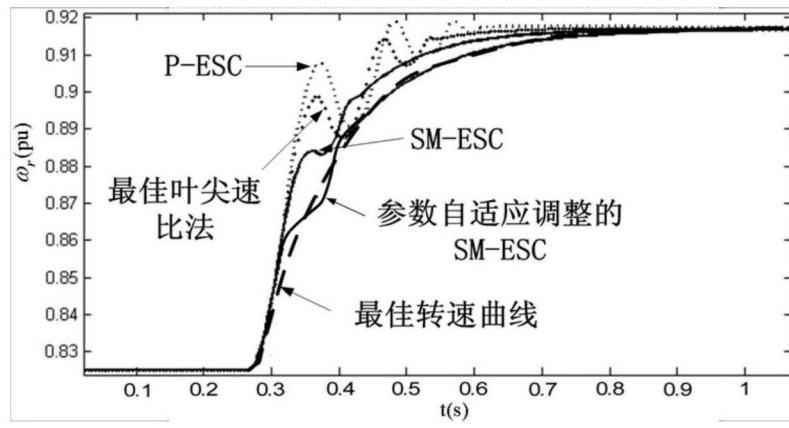


图 6

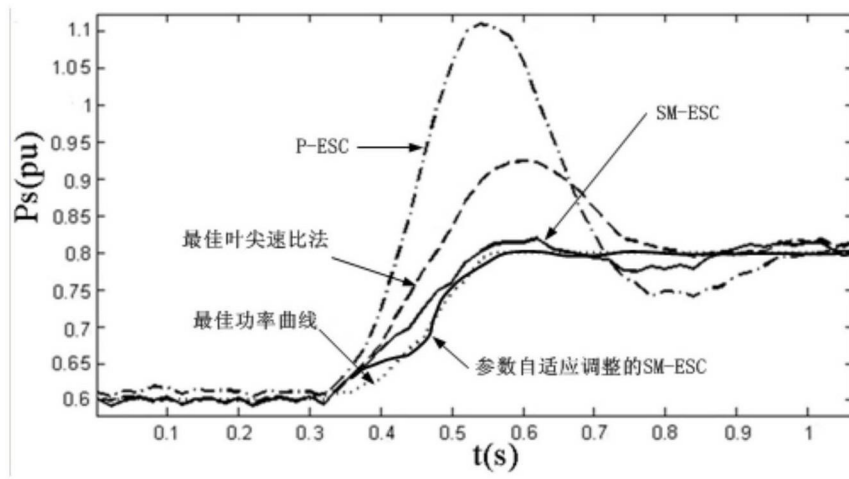


图 7