



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106786686 B

(45)授权公告日 2019.05.03

(21)申请号 201710052137.5

H02J 3/46(2006.01)

(22)申请日 2017.01.22

H02J 3/48(2006.01)

(65)同一申请的已公布的文献号

审查员 侯雪

申请公布号 CN 106786686 A

(43)申请公布日 2017.05.31

(73)专利权人 东北电力大学

地址 132012 吉林省吉林市船营区长春路
169号

(72)发明人 穆钢 李军徽 严干贵 国敢

(74)专利代理机构 吉林市达利专利事务所

22102

代理人 陈传林

(51)Int.Cl.

H02J 3/28(2006.01)

H02J 3/38(2006.01)

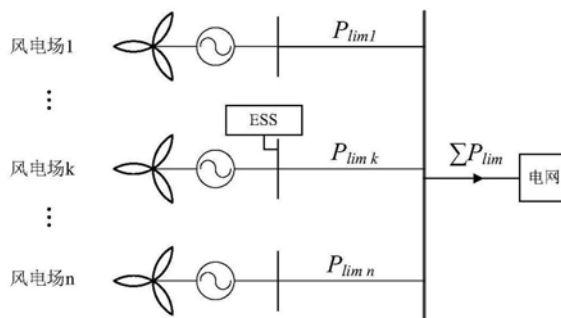
权利要求书3页 说明书9页 附图3页

(54)发明名称

利用储能正外部性削减多风电场弃风的风-储系统协调控制策略

(57)摘要

本发明是一种利用储能正外部性削减多风电场弃风的风-储系统协调控制策略,其特点是,包括:确立多风电场联合外送环境下风电场输电限额的分配原则、储能系统的外部性原理分析、利用储能正外部性削减多风电场弃风的风-储系统协调控制策略分析等内容,在本控制策略下,充分利用了储能的可用功率和容量产生的正外部性,在保证本地风电场弃风缓解的同时尽可能地减少了其他风电场的弃风,提高了储能利用率,优化了储能缓解弃风的效果,具有科学合理,适用性强,效果佳等优点。



1. 一种利用储能系统的正外部性削减多风电场弃风的风-储系统协调控制策略,其特征是,它包括以下内容:

1) 多风电场联合外送环境下风电场输电功率限额的分配原则

风电场1、2、……、n构成了一座风电场群,风电场群中的风电场k, $k=1、2、……、n$,是唯一装有储能系统的风电场;风电场群通过一条外送输电通道向电网送出风电功率和能量,各风电场的输电功率限额之和等于总线路输电功率限额 ΣP_{lim} ,由式(1)求得:

$$\Sigma P_{lim} = P_{lim1} + P_{lim2} + \dots + P_{limn} \quad (1)$$

在t时刻,若总线路输电功率限额 ΣP_{lim} 高于风电场群功率输出瞬时值 $\Sigma P'(t)$,则风电功率将不会受到限制,风电场群总输出功率将等于风电场群功率输出瞬时值 $\Sigma P'(t)$;

在t时刻,若总线路输电功率限额 ΣP_{lim} 低于风电场群功率输出瞬时值 $\Sigma P'(t)$,则会产生弃风;为了合理地安排风电场群的每座风电场的弃风功率,风电场群的每座风电场获得的输电功率限额 P_{lim1} 、……、 P_{limn} 将根据各座风电场的装机容量大小来进行分配,分配原则如式(2):

$$P_{limi} = \frac{P_{Gi}}{\Sigma P_{Gi}} \Sigma P_{lim} \quad (2)$$

其中, $i=1 \dots n$; P_{Gi} 为第i座风电场的装机容量, ΣP_{Gi} 则代表整个风电场群的装机容量; P_{limi} 代表第i座风电场的输电功率限额, ΣP_{lim} 则代表总线路输电功率限额;

经过输电功率限额的分配,如果风电场i的功率输出瞬时值 $P_i(t)$ 低于风电场i的输电功率限额 P_{limi} ,则风电场i的输出功率将等于 $P_i(t)$;如果风电场i的功率输出瞬时值 $P_i(t)$ 高于风电场i的输电功率限额 P_{limi} ,则风电场i的输出功率等于 P_{limi} ;

按式(2)分配原则,输电功率限额得到了一定程度上的公平分配,按照对应风电场的装机容量确定输电功率限额不会使某个风电场的输电功率限额过于严苛或过于宽松,相当于对输电功率限额按照装机容量进行了加权平均;另外,由于装机容量是事先已知的,故这样的分配相对来讲更为容易实现;

2) 储能系统的外部性

所谓储能系统的外部性是指,储能系统可以对风电场群中其他未配置储能系统的风电场的输出功率、输出电量、输出功率波动特性等多种参数产生间接影响的储能特性;而储能系统的正外部性即是指,储能系统可以对风电场群中其他未配置储能系统的风电场的输出功率、输出电量、输出功率波动特性等多种参数产生有益的间接影响的储能特性,如果风电场群输出功率受到了限制,而且配置了储能系统的风电场又在完成了本地弃风削减任务的基础上存在剩余功率或容量,那么储能系统就有可能发挥外部性,储能系统正外部性的实现是通过降低本地风电场的输出功率来间接提高其他风电场的输电功率限额,从而使其他风电场能够提高输出功率,实现风电输出电量的增加;

储能系统在充放电的过程中不仅要检测本地风电场的弃风功率,还要同时检测临近的其他风电场弃风功率大小;也就是说,在受到额定充放电功率约束的同时,储能系统要根据区域内多个风电场的弃风情况来确定具体的充放电功率;

因此,t时刻的储能功率 $P_{ESS}(t)$ 分为两个部分:t时刻用于减少本地风电场弃风的储能功率 $P_{ESS}^{self}(t)$ 和t时刻用于发挥储能系统外部性的储能功率 $P_{ESS}^{ext}(t)$; $P_{ESS}^{self}(t)$ 和 $P_{ESS}^{ext}(t)$ 满足式(3)关系:

$$P_{ESS}(t) = P_{ESS}^{self}(t) + P_{ESS}^{ext}(t) \quad (P_{ESS}(t) > 0) \quad (3)$$

t时刻用于减少本地风电场弃风的储能功率 $P_{ESS}^{self}(t)$ 和t时刻用于发挥储能系统外部性的储能功率 $P_{ESS}^{ext}(t)$ 的具体大小将根据各个风电场的弃风情况以及具体的控制策略而确定；

$P_{ESS}^{ext}(t)$ 作为t时刻的储能功率 $P_{ESS}(t)$ 的组成部分,吸收了本地风电场输出功率的一部分,但这部分功率不属于弃风功率, $P_{ESS}^{ext}(t)$ 减小了t时刻本地风电场的输出功率,因而使t时刻下其他风电场的输电功率限额提高了 $P_{ESS}^{ext}(t)$,关系满足式(4)：

$$P_{ESS}^{ext} = P_{ESS}(t) - P_{ESS}^{self}(t) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \Delta P_{limi} \quad (4)$$

其中, ΔP_{limi} 是风电场i输电功率限额的增加量；

换言之,根据储能系统的外部性原则,储能系统可以通过控制储能充放电功率来间接改变其他风电场的输电功率限额,从而改变其他风电场的输出功率,实现储能系统干预其他风电场的功率输出；

3) 利用储能系统的正外部性削减多风电场弃风的风-储系统协调控制策略分析

在利用储能系统的正外部性削减多风电场弃风的风-储系统协调控制策略下储能系统的充放电策略为式(5)：

$$P_{ESS}(t) = \begin{cases} P_{rate} & \sum P(t) - \sum P_{lim} \geq P_{rate} \ \& \ W_{ESS}(t) < W_{rate} \\ \sum P(t) - \sum P_{lim} & -P_{rate} < \sum P(t) - \sum P_{lim} < P_{rate} \ \& \ W_{ESS}(t) > 0 \\ -P_{rate} & \sum P(t) - \sum P_{lim} \leq -P_{rate} \ \& \ W_{ESS}(t) > 0 \\ 0 & others \end{cases} \quad (5)$$

其中 $P_{ESS}(t)$ 为t时刻的储能功率, $P_{ESS}(t)$ 为正表示储能系统充电, $P_{ESS}(t)$ 为负表示储能系统放电; P_{rate} 表示储能系统的额定功率; $\sum P(t)$ 为t时刻风电场群的总输出功率; $\sum P_{lim}$ 为总线路输电功率限额; $W_{ESS}(t)$ 为t时刻储能系统中的电能量; W_{rate} 为储能系统的额定容量；

式(5)表明在受到额定功率限制的前提下,储能功率大小取决于风电场群的总体输出；当多个风电场存在弃风的时候,储能功率将超过本风电场的弃风功率,从而对其他风电场体现正外部性；

t时刻风电场群的总输出功率 $\sum P(t)$ 在数值上等于t时刻各个风电场输出功率之和,如式(6)：

$$\sum P(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t) \quad (6)$$

式(6)中的 $P_i(t)$ 表示第i座风电场的输出功率, $i=1,2,\dots,n$ ；

t时刻储能系统中的电能量 $W_{ESS}(t)$ 表示为式(7)：

$$W_{ESS}(t) = \int_0^t P_{ESS}(x) dx \quad (7)$$

配置储能系统的风电场k的t时刻的弃风功率 $P_{cur k}(t)$ 表示为式(8)：

$$P_{cur k}(t) = \begin{cases} P_k(t) - P_{limk} & P_k(t) \geq P_{limk} \\ 0 & P_k(t) < P_{limk} \end{cases} \quad (8)$$

同理,风电场群t时刻的弃风功率 $P_{\sum cur}(t)$ 表示为式(9)：

$$P_{\Sigma cur}(t) = \begin{cases} \Sigma P(t) - \Sigma P_{lim} & \Sigma P(t) \geq \Sigma P_{lim} \\ 0 & \Sigma P(t) < \Sigma P_{lim} \end{cases} \quad (9)$$

储能系统充放电过程中t时刻用于减少本地风电场弃风的储能功率 $P_{ESS}^{self}(t)$ 表示为式(10)：

$$P_{ESS}^{self}(t) = \begin{cases} P_{curk}(t) & P_{curk}(t) \leq P_{rate} \\ P_{ESS} & P_{curk}(t) > P_{rate} \end{cases} \quad (10)$$

t时刻用于发挥储能系统正外部性的储能功率 $P_{ESS}^{ext}(t)$ 表示为式(11)：

$$P_{ESS}^{ext}(t) = P_{ESS}(t) - P_{ESS}^{self}(t) \quad (11)$$

相应的,到t时刻为止储能系统用于正外部性的累计容量 $W_{ESS}^{ext}(t)$ 为式(12)：

$$W_{ESS}^{ext}(t) = \int_0^t P_{ESS}^{ext}(x) dx \quad (12)$$

根据储能系统的正外部性原则,由于储能系统存储了超过本地弃风功率的风电功率,本地风电场的输出功率便降低到了输电功率限额以下,其他未配置储能系统的风电场的输电功率限额因此而能够得到提高,在储能系统正外部性的作用下这些未配置储能系统的风电场具备了增加功率输出的能力;t时刻风电场i对应增加的风电功率值为 $\Delta P_i(t)$,其具体取值可以由调度人员安排确定;全部n-1个未配置储能系统的风电场发电功率增加量总和为 $\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \Delta P_i(t)$,其值等于风电场群增加的总功率输出,表示为式(13)：

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \Delta P_i(t) = \begin{cases} P_{ESS}(t) - [P_k(t) - P_{limk}] & P_{ESS}(t) - [P_k(t) - P_{limk}] \geq 0 \& P_{ESS}(t) \geq 0 \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (13)$$

$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \Delta P_i(t)$ 和 $P_{ESS}^{ext}(t)$ 是不相等的,由于风电场之间的汇聚效应使得一部分风电功率互补抵消,在时刻t上满足 $\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \Delta P_i(t) > P_{ESS}^{ext}(t)$;

无储能系统风电场的总功率输出增加以后表示为式(14)：

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n P_i'(t) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n [P_i(t) + \Delta P_i(t)] \quad (14)$$

到t时刻为止,无储能系统风电场增加的总输出电量表示为式(15)：

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \Delta W_i(t) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \int_0^t \Delta P_i(x) dx \quad (15)$$

利用储能正外部性削减多风电场弃风的风-储系统协调控制策略

技术领域

[0001] 本发明涉及新能源发电、储能技术领域,是一种利用储能正外部性削减多风电场弃风的风-储系统协调控制策略。

背景技术

[0002] 低碳电力推动风电大规模发展,风电在电网中的渗透率显著增加;风电机组输出功率具有随机性、间歇性和波动性等特点,风电与负荷难以保持平衡,给风电消纳造成了一定困难;风电资源充沛的地区网架结构薄弱,风电外送的能力有限。这些问题是造成我国风电开发过程中弃风现象严重的根本原因所在。储能作为一项有效的弃风削减措施,得到了普遍的重视与研究。

[0003] 国内外学者分别从以下几个方面开展了研究:1)改进储能运行的控制策略,优化其充放电效率,提高储能对弃风的削减能力;2)应用储能参与调峰,提高风电消纳,减少弃风;3)应用储能提高输电线路可用传输能力,提高风电外送,减小弃风。然而在这些研究中,储能的应用一般都局限于单风电场-单储能系统的场景,储能的作用范围被限制在了配置了储能的本地风电场内,对于更大范围的风电系统没有影响力了。然而,在实际的储能应用过程中,由于风电出力的高度随机性,储能的利用程度总是无法保持恒定。如果在储能安装规划阶段按照风电出力最差的数据进行储能配置,那么储能在实际运行中肯定会经常处于较低的利用率水平。储能应用需要一种更灵活的控制策略来协调控制风-储联合系统,提高储能的利用水平,进一步发挥储能的潜力。

发明内容

[0004] 本发明所要解决的技术问题是,克服现有技术的缺点,提供一种更科学合理、更灵活、适用性强,能够有效的提高储能功率和容量利用率,可削减多个风电场弃风的广域协调储能控制策略;

[0005] 解决其技术问题采用的技术方案是,一种利用储能系统的正外部性削减多风电场弃风的风-储系统协调控制策略,其特征是,它包括以下内容:

[0006] 1)多风电场联合外送环境下风电场输电功率限额的分配原则

[0007] 风电场1、2、……、n构成了一座风电场群,风电场群中的风电场k,k=1、2、……、n,是唯一装有储能系统的风电场;风电场群通过一条外送输电通道向电网送出风电功率和能量,各风电场的输电功率限额之和等于总线路输电功率限额 ΣP_{lim} ,由式(1)求得:

[0008]
$$\Sigma P_{lim} = P_{lim1} + P_{lim2} + \dots + P_{limn} \quad (1)$$

[0009] 在t时刻,若总线路输电功率限额 ΣP_{lim} 高于风电场群功率输出瞬时值 $\Sigma P'(t)$,则风电功率将不会受到限制,风电场群总输出功率将等于风电场群功率输出瞬时值 $\Sigma P'(t)$;

[0010] 在t时刻,若总线路输电功率限额 ΣP_{lim} 低于风电场群功率输出瞬时值 $\Sigma P'(t)$,则会产生弃风;为了合理地安排风电场群的每座风电场的弃风功率,风电场群的每座风电场

获得的输电功率限额 P_{lim1} 、 \dots 、 P_{limn} 将根据各座风电场的装机容量大小来进行分配,分配原则如式(2):

$$[0011] \quad P_{limi} = \frac{P_{Gi}}{\sum P_{Gi}} \sum P_{lim} \quad (2)$$

[0012] 其中, $i=1 \dots n$; P_{Gi} 为第*i*座风电场的装机容量, $\sum P_{Gi}$ 则代表整个风电场群的装机容量; P_{limi} 代表第*i*座风电场的输电功率限额, $\sum P_{lim}$ 则代表总线路输电功率限额;

[0013] 经过输电功率限额的分配,如果风电场*i*的功率输出瞬时值 $P_i(t)$ 低于风电场*i*的输电功率限额 P_{limi} ,则风电场*i*的输出功率将等于 $P_i(t)$;如果风电场*i*的功率输出瞬时值 $P_i(t)$ 高于风电场*i*的输电功率限额 P_{limi} ,则风电场*i*的输出功率等于 P_{limi} ;

[0014] 按式(2)分配原则,输电功率限额得到了一定程度上的公平分配,按照对应风电场的装机容量确定输电功率限额不会使某个风电场的输电功率限额过于严苛或过于宽松,相当于对输电功率限额按照装机容量进行了加权平均;另外,由于装机容量是事先已知的,故这样的分配相对来讲更为容易实现;

[0015] 2) 储能系统的外部性

[0016] 所谓储能系统的外部性是指,储能系统可以对风电场群中其他未配置储能系统的风电场的输出功率、输出电量、输出功率波动特性等多种参数产生间接影响的储能特性;而储能系统的正外部性即是指,储能系统可以对风电场群中其他未配置储能系统的风电场的输出功率、输出电量、输出功率波动特性等多种参数产生有益的间接影响的储能特性,如果风电场群输出功率受到了限制,而且配置了储能系统的风电场又在完成了本地弃风削减任务的基础上存在剩余功率或容量,那么储能系统就有可能发挥外部性,储能系统正外部性的实现是通过降低本地风电场的输出功率来间接提高其他风电场的输电功率限额,从而使其他风电场能够提高输出功率,实现风电输出电量的增加;

[0017] 储能系统在充放电的过程中不仅要检测本地风电场的弃风功率,还要同时检测临近的其他风电场弃风功率大小;也就是说,在受到额定充放电功率约束的同时,储能系统要根据区域内多个风电场的弃风情况来确定具体的充放电功率;

[0018] 因此, t 时刻的储能功率 $P_{ESS}(t)$ 分为两个部分: t 时刻用于减少本地风电场弃风的储能功率 $P_{ESS}^{self}(t)$ 和 t 时刻用于发挥储能系统外部性的储能功率 $P_{ESS}^{ext}(t)$; $P_{ESS}^{self}(t)$ 和 $P_{ESS}^{ext}(t)$ 满足式(3)关系:

$$[0019] \quad P_{ESS}(t) = P_{ESS}^{self}(t) + P_{ESS}^{ext}(t) \quad (P_{ESS}(t) > 0) \quad (3)$$

[0020] t 时刻用于减少本地风电场弃风的储能功率 $P_{ESS}^{self}(t)$ 和 t 时刻用于发挥储能系统外部性的储能功率 $P_{ESS}^{ext}(t)$ 的具体大小将根据各个风电场的弃风情况以及具体的控制策略而确定;

[0021] $P_{ESS}^{ext}(t)$ 作为 t 时刻的储能功率 $P_{ESS}(t)$ 的组成部分,吸收了本地风电场输出功率的一部分,但这部分功率不属于弃风功率, $P_{ESS}^{ext}(t)$ 减小了 t 时刻本地风电场的输出功率,因而使 t 时刻下其他风电场的输电功率限额提高了 $P_{ESS}^{ext}(t)$,关系满足式(4):

$$[0022] \quad P_{ESS}^{ext} = P_{ESS}(t) - P_{ESS}^{self}(t) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \Delta P_{limi} \quad (4)$$

[0023] 其中, ΔP_{limi} 是风电场*i*输电功率限额的增加量;

[0024] 换言之,根据储能系统的外部性原则,储能系统可以通过控制储能充放电功率来间接改变其他风电场的输电功率限额,从而改变其他风电场的输出功率,实现储能系统干预其他风电场的功率输出;

[0025] 3) 利用储能系统的正外部性削减多风电场弃风的风-储系统协调控制策略分析

[0026] 在利用储能系统的正外部性削减多风电场弃风的风-储系统协调控制策略下储能系统的充放电策略为式(5):

$$[0027] \quad P_{ESS}(t) = \begin{cases} P_{rate} & \sum P(t) - \sum P_{lim} \geq P_{rate} \ \& \ W_{ESS}(t) < W_{rate} \\ \sum P(t) - \sum P_{lim} & -P_{rate} < \sum P(t) - \sum P_{lim} < P_{rate} \ \& \ W_{ESS}(t) > 0 \\ -P_{rate} & \sum P(t) - \sum P_{lim} \leq -P_{rate} \ \& \ W_{ESS}(t) > 0 \\ 0 & others \end{cases} \quad (5)$$

[0028] 其中 $P_{ESS}(t)$ 为*t*时刻的储能功率, $P_{ESS}(t)$ 为正表示储能系统充电, $P_{ESS}(t)$ 为负表示储能系统放电; P_{rate} 表示储能系统的额定功率; $\sum P(t)$ 为*t*时刻风电场群的总输出功率; $\sum P_{lim}$ 为总线路输电功率限额; $W_{ESS}(t)$ 为*t*时刻储能系统中的电能量; W_{rate} 为储能系统的额定容量;

[0029] 式(5)表明在受到额定功率限制的前提下,储能功率大小取决于风电场群的总体输出;当多个风电场存在弃风的时候,储能功率将超过本风电场的弃风功率,从而对其他风电场体现正外部性;

[0030] *t*时刻风电场群的总输出功率 $\sum P(t)$ 在数值上等于*t*时刻各个风电场输出功率之和,如式(6):

$$[0031] \quad \sum P(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t) \quad (6)$$

[0032] 式(6)中的 $P_i(t)$ 表示第*i*座风电场的输出功率, $i=1,2,\dots,n$;

[0033] *t*时刻储能系统中的电能量 $W_{ESS}(t)$ 表示为式(7):

$$[0034] \quad W_{ESS}(t) = \int_0^t P_{ESS}(x) dx \quad (7)$$

[0035] 配置储能系统的风电场*k*的*t*时刻的弃风功率 $P_{cur k}(t)$ 表示为式(8):

$$[0036] \quad P_{cur k}(t) = \begin{cases} P_k(t) - P_{limk} & P_k(t) \geq P_{limk} \\ 0 & P_k(t) < P_{limk} \end{cases} \quad (8)$$

[0037] 同理,风电场群*t*时刻的弃风功率 $P_{\sum cur}(t)$ 表示为式(9):

$$[0038] \quad P_{\sum cur}(t) = \begin{cases} \sum P(t) - \sum P_{lim} & \sum P(t) \geq \sum P_{lim} \\ 0 & \sum P(t) < \sum P_{lim} \end{cases} \quad (9)$$

[0039] 储能系统充放电过程中*t*时刻用于减少本地风电场弃风的储能功率 $P_{ESS}^{self}(t)$ 表示为式(10):

$$[0040] \quad P_{ESS}^{self}(t) = \begin{cases} P_{cur k}(t) & P_{cur k}(t) \leq P_{rate} \\ P_{ESS} & P_{cur k}(t) > P_{rate} \end{cases} \quad (10)$$

[0041] *t*时刻用于发挥储能系统正外部性的储能功率 $P_{ESS}^{ext}(t)$ 表示为式(11):

$$[0042] \quad P_{ESS}^{ext}(t) = P_{ESS}(t) - P_{ESS}^{self}(t) \quad (11)$$

[0043] 相应的,到t时刻为止储能系统用于正外部性的累计容量 $W_{ESS}^{ext}(t)$ 为式(12):

$$[0044] \quad W_{ESS}^{ext}(t) = \int_0^t P_{ESS}^{ext}(x) dx \quad (12)$$

[0045] 根据储能系统的正外部性原则,由于储能系统存储了超过本地弃风功率的风电功率,本地风电场的输出功率便降低到了输电功率限额以下,其他未配置储能系统的风电场的输电功率限额因此而能够得到提高,在储能系统正外部性的作用下这些未配置储能系统的风电场具备了增加功率输出的能力;t时刻风电场i对应增加的风电功率值为 $\Delta P_i(t)$,其具体取值可以由调度人员安排确定;全部n-1个未配置储能系统的风电场发电功率增加量

总和为 $\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \Delta P_i(t)$,其值等于风电场群增加的总功率输出,表示为式(13):

$$[0046] \quad \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \Delta P_i(t) = \begin{cases} P_{ESS}(t) - [P_k(t) - P_{limk}] & P_{ESS}(t) - [P_k(t) - P_{limk}] \geq 0 \& P_{ESS}(t) \geq 0 \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (13)$$

[0047] $\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \Delta P_i(t)$ 和 $P_{ESS}^{ext}(t)$ 是不相等的,由于风电场之间的汇聚效应使得一部分风电功率互

补抵消,在时刻t上满足 $\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \Delta P_i(t) > P_{ESS}^{ext}(t)$;

[0048] 无储能系统风电场的总功率输出增加以后表示为式(14):

$$[0049] \quad \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n P_i'(t) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n [P_i(t) + \Delta P_i(t)] \quad (14)$$

[0050] 到t时刻为止,无储能系统风电场增加的总输出电量表示为式(15):

$$[0051] \quad \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \Delta W_i(t) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \int_0^t \Delta P_i(x) dx \quad (15)$$

[0052] 本发明的利用储能正外部性削减多风电场弃风的风-储系统协调控制策略,使储能系统仅对本地风电场能量进行充放,却可以减小多个风电场的弃风,使储能系统的影响范围扩大了,从储能系统附属的本地风电场扩大到了整个风电场群;由于储能功率利用不足而造成的闲置储能容量也得到了充分利用,利用率被进一步提高;储能系统的经济效益会因为其利用率的提高而得到进一步提升,投资成本的回收时间也必然会缩短;具有更科学合理、更灵活、适用性强,能够有效的提高储能利用率,效果佳等优点。

附图说明

[0053] 图1单风电场配置储能系统的风电场集群联合外送场景示意图;

[0054] 图2储能系统外部性原则示意图;

[0055] 图3储能系统的外部性:场景1($E_{cur} < W_{rate}$ 且 $\max\{P_{cur}(t)\} < P_{rate}$);

[0056] 图4储能系统的外部性:场景2($\max\{P_{cur}(t)\} > P_{rate}$);

[0057] 图5储能系统的外部性:场景3($E_{cur} > W_{rate}$);

[0058] 图6储能系统的外部性:场景4($E_{cur} = 0$)。

具体实施方式

[0059] 下面利用附图和实施例对本发明的利用储能系统的正外部性削减多风电场弃风的风-储系统协调控制策略作进一步说明；

[0060] 本发明的一种利用储能正外部性削减多风电场弃风的风-储系统协调控制策略，其特征是，它包括以下内容：

[0061] 4) 多风电场联合外送环境下风电场输电功率限额的分配原则

[0062] 风电场1、2、……、n构成了一座风电场群，风电场群中的风电场k，k=1、2、……、n，是唯一装有储能系统的风电场；风电场群通过一条外送输电通道向电网送出风电功率和能量，各风电场的输电功率限额之和等于总线路输电功率限额 ΣP_{lim} ，由式(1)求得：

$$[0063] \quad \Sigma P_{lim} = P_{lim1} + P_{lim2} + \dots + P_{limn} \quad (1)$$

[0064] 在t时刻，若总线路输电功率限额 ΣP_{lim} 高于风电场群功率输出瞬时值 $\Sigma P'(t)$ ，则风电功率将不会受到限制，风电场群总输出功率将等于风电场群功率输出瞬时值 $\Sigma P'(t)$ ；

[0065] 在t时刻，若总线路输电功率限额 ΣP_{lim} 低于风电场群功率输出瞬时值 $\Sigma P'(t)$ ，则会产生弃风；为了合理地安排风电场群的每座风电场的弃风功率，风电场群的每座风电场获得的输电功率限额 P_{lim1} 、……、 P_{limn} 将根据各座风电场的装机容量大小来进行分配，分配原则如式(2)：

$$[0066] \quad P_{limi} = \frac{P_{Gi}}{\Sigma P_{Gi}} \Sigma P_{lim} \quad (2)$$

[0067] 其中，i=1……n； P_{Gi} 为第i座风电场的装机容量， ΣP_{Gi} 则代表整个风电场群的装机容量； P_{limi} 代表第i座风电场的输电功率限额， ΣP_{lim} 则代表总线路输电功率限额；

[0068] 经过输电功率限额的分配，如果风电场i的功率输出瞬时值 $P_i(t)$ 低于风电场i的输电功率限额 P_{limi} ，则风电场i的输出功率将等于 $P_i(t)$ ；如果风电场i的功率输出瞬时值 $P_i(t)$ 高于风电场i的输电功率限额 P_{limi} ，则风电场i的输出功率等于 P_{limi} ；

[0069] 按式(2)分配原则，输电功率限额得到了一定程度上的公平分配，按照对应风电场的装机容量确定输电功率限额不会使某个风电场的输电功率限额过于严苛或过于宽松，相当于对输电功率限额按照装机容量进行了加权平均；另外，由于装机容量是事先已知的，故这样的分配相对来讲更为容易实现；

[0070] 5) 储能系统的外部性

[0071] 所谓储能系统的外部性是指，储能系统可以对风电场群中其他未配置储能系统的风电场的输出功率、输出电量、输出功率波动特性等多种参数产生间接影响的储能特性；而储能系统的正外部性即是指，储能系统可以对风电场群中其他未配置储能系统的风电场的输出功率、输出电量、输出功率波动特性等多种参数产生有益的间接影响的储能特性，如果风电场群输出功率受到了限制，而且配置了储能系统的风电场又在完成了本地弃风削减任务的基础上存在剩余功率或容量，那么储能系统就有可能发挥外部性，储能系统正外部性的实现是通过降低本地风电场的输出功率来间接提高其他风电场的输电功率限额，从而使其他风电场能够提高输出功率，实现风电输出电量的增加；

[0072] 储能系统在充放电的过程中不仅要检测本地风电场的弃风功率，还要同时检测临近的其他风电场弃风功率大小；也就是说，在受到额定充放电功率约束的同时，储能系统要根据区域内多个风电场的弃风情况来确定具体的充放电功率；

[0073] 因此,根据上述分析,t时刻的储能功率 $P_{ESS}(t)$ 分为两个部分:t时刻用于减少本地风电场弃风的储能功率 $P_{ESS}^{self}(t)$ 和t时刻用于发挥储能系统外部性的储能功率 $P_{ESS}^{ext}(t)$; $P_{ESS}^{self}(t)$ 和 $P_{ESS}^{ext}(t)$ 满足式(3)关系:

$$[0074] \quad P_{ESS}(t) = P_{ESS}^{self}(t) + P_{ESS}^{ext}(t) \quad (P_{ESS}(t) > 0) \quad (3)$$

[0075] t时刻用于减少本地风电场弃风的储能功率 $P_{ESS}^{self}(t)$ 和t时刻用于发挥储能系统外部性的储能功率 $P_{ESS}^{ext}(t)$ 的具体大小将根据各个风电场的弃风情况以及具体的控制策略而确定;

[0076] $P_{ESS}^{ext}(t)$ 作为t时刻的储能功率 $P_{ESS}(t)$ 的组成部分,吸收了本地风电场输出功率的一部分,但这部分功率不属于弃风功率, $P_{ESS}^{ext}(t)$ 减小了t时刻本地风电场的输出功率,因而使t时刻下其他风电场的输电功率限额提高了 $P_{ESS}^{ext}(t)$,关系满足式(4):

$$[0077] \quad P_{ESS}^{ext} = P_{ESS}(t) - P_{ESS}^{self}(t) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \Delta P_{limi} \quad (4)$$

[0078] 其中, ΔP_{limi} 是风电场i输电功率限额的增加量;

[0079] 换言之,根据储能的外部性原则,储能系统可以通过控制储能充电功率来间接改变其他风电场的输电功率限额,从而改变其他风电场的输出功率,实现储能干预其他风电场的功率输出;

[0080] 6) 利用储能系统的正外部性削减多风电场弃风的风-储系统协调控制策略分析

[0081] 在利用储能系统的正外部性削减多风电场弃风的风-储系统协调控制策略下储能的充放电策略为式(5):

$$[0082] \quad P_{ESS}(t) = \begin{cases} P_{rate} & \sum P(t) - \sum P_{lim} \geq P_{rate} \ \& \ W_{ESS}(t) < W_{rate} \\ \sum P(t) - \sum P_{lim} & -P_{rate} < \sum P(t) - \sum P_{lim} < P_{rate} \ \& \ W_{ESS}(t) > 0 \\ -P_{rate} & \sum P(t) - \sum P_{lim} \leq -P_{rate} \ \& \ W_{ESS}(t) > 0 \\ 0 & others \end{cases} \quad (5)$$

[0083] 其中 $P_{ESS}(t)$ 为t时刻的储能功率, $P_{ESS}(t)$ 为正表示储能系统充电, $P_{ESS}(t)$ 为负表示储能系统放电; P_{rate} 表示储能系统的额定功率; $\sum P(t)$ 为t时刻风电场群的总发电功率; $\sum P_{lim}$ 为总线路输电功率限额; $W_{ESS}(t)$ 为t时刻储能系统中的电能量; W_{rate} 为储能系统的额定容量;

[0084] 式(5)表明在受到额定功率限制的前提下,储能的功率大小取决于风电场群的总体输出;当多个风电场存在弃风的时候,储能功率将超过本风场的弃风功率,从而对其他风电场体现外部性;

[0085] t时刻风电场群的总输出功率 $\sum P(t)$ 在数值上等于t时刻各个风电场输出功率之和,如式(6):

$$[0086] \quad \sum P(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t) \quad (6)$$

[0087] 式(6)中的 $P_i(t)$ 表示第i座风电场的输出功率, $i=1,2,\dots,n$;

[0088] t时刻储能系统中的电能量 $W_{ESS}(t)$ 表示为式(7):

$$[0089] \quad W_{ESS}(t) = \int_0^t P_{ESS}(x) dx \quad (7)$$

[0090] 配置储能系统的风电场k的t时刻的弃风功率 $P_{cur\ k}(t)$ 表示为式(8)：

$$[0091] \quad P_{cur\ k}(t) = \begin{cases} P_k(t) - P_{lim\ k} & P_k(t) \geq P_{lim\ k} \\ 0 & P_k(t) < P_{lim\ k} \end{cases} \quad (8)$$

[0092] 同理,风电场群t时刻的弃风功率 $P_{\Sigma cur}(t)$ 表示为式(9)：

$$[0093] \quad P_{\Sigma cur}(t) = \begin{cases} \Sigma P(t) - \Sigma P_{lim} & \Sigma P(t) \geq \Sigma P_{lim} \\ 0 & \Sigma P(t) < \Sigma P_{lim} \end{cases} \quad (9)$$

[0094] 储能充放电的过程中t时刻用于减少本地风电场弃风的储能功率 $P_{ESS}^{self}(t)$ 可表示为式(10)：

$$[0095] \quad P_{ESS}^{self}(t) = \begin{cases} P_{cur\ k}(t) & P_{cur\ k}(t) \leq P_{rate} \\ P_{ESS} & P_{cur\ k}(t) > P_{rate} \end{cases} \quad (10)$$

[0096] t时刻用于发挥储能系统外部性的储能功率 $P_{ESS}^{ext}(t)$ 可表示为式(11)：

$$[0097] \quad P_{ESS}^{ext}(t) = P_{ESS}(t) - P_{ESS}^{self}(t) \quad (11)$$

[0098] 相应的,到t时刻为止储能用于外部性的累计容量 $W_{ESS}^{ext}(t)$ 为式(12)：

$$[0099] \quad W_{ESS}^{ext}(t) = \int_0^t P_{ESS}^{ext}(x) dx \quad (12)$$

[0100] 根据储能系统的外部性原则,由于储能系统存储了超过本地弃风功率的风电功率,本地风电场的外送功率便降低到了输电功率限额以下,其他未配置储能系统的风电场的输电功率限额因此而能够得到提高,在储能系统外部性的作用下这些未配置储能系统的风电场具备了增加功率输出的能力;t时刻风电场i对应增加的风电功率值为 $\Delta P_i(t)$,其具体取值可以由调度人员安排确定;全部n-1个未配置储能系统的风电场输出功率增加量总和为 $\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \Delta P_i(t)$,其值等于风电场群增加的总功率输出,表示为式(13)：

$$[0101] \quad \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \Delta P_i(t) = \begin{cases} P_{ESS}(t) - [P_k(t) - P_{lim\ k}] & P_{ESS}(t) - [P_k(t) - P_{lim\ k}] \geq 0 \ \& \ P_{ESS}(t) \geq 0 \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (13)$$

[0102] $\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \Delta P_i(t)$ 和 $P_{ESS}^{ext}(t)$ 是不相等的,由于风电场之间的汇聚效应使得一部分风电功率互

补抵消,在时刻t上满足 $\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \Delta P_i(t) > P_{ESS}^{ext}(t)$;

[0103] 无储能系统风电场的总功率输出增加以后表示为(14)：

$$[0104] \quad \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n P_i'(t) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n [P_i(t) + \Delta P_i(t)] \quad (14)$$

[0105] 到t时刻为止,无储能系统风电场增加的总输出电量表示为式(15)：

$$[0106] \quad \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \Delta W_i(t) = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n \int_0^t \Delta P_i(x) dx \quad (15)。$$

[0107] 从上述控制策略可以看出,储能系统仅对本地风电场能量进行了充放但却实现了减小多个风电场弃风的目的;在此控制策略下,储能系统的影响范围扩大了,从储能系统附

属的本地风电场扩大到了整个风电场群；由于储能功率利用不足而造成的闲置储能容量也得到了充分利用，利用率被进一步提高；储能系统的经济效益会因为其利用率的提高而得到进一步提升，投资成本的回收时间也必然会缩短；

[0108] 以上陈述的本发明中利用储能系统的正外部性削减多风电场弃风的风-储系统协调控制策略的基础数学模型，为了进一步解释本控制策略的工作机制，下面将结合示意图进一步说明其具体实施过程；

[0109] 图1展示了包含n个风电场的风电场群，这n个风电场通过同一条输电线路集结向电网输送风电功率；风电场1、风电场2、……风电场n的输电功率限额如图1中所示，分别对应为 P_{lim1} 、 P_{lim2} 、…… P_{limn} ，风电场群的输电功率限额为 $P_{\Sigma lim}$ ；风电场k， $k=1、\dots、n$ ，是唯一一座配置有储能系统的风电场。

[0110] 图2展示了储能系统按照外部性原则工作的基本过程；有储能的风电场k由于储能系统按照本发明所述的储能系统外部性原则进行了充电功率为 $P_{ESS}(t)$ 的充电操作，故风电场k的输出功率值跌落了 $P_{ESS}(t)$ ；其中 $P_{ESS}^{self}(t)$ 是配有储能系统的风电场k自用的储能功率，在图2中 $P_{ESS}^{self}(t)$ 对应的阴影区域表示风电场k自用的储能能量； $P_{ESS}^{ext}(t)$ 是用于发挥储能系统外部性的储能功率，其服务对象是未配置储能系统的其他风电场，在图2中 $P_{ESS}^{ext}(t)$ 对应的阴影区域表示用于外部性的储能能量；由于储能系统的外部性作用，其他未配置储能系统的风电场获得了额外的输电限额，风电场i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) 对应的输电限额增加了 $\Delta P_{lim i}$ ，未配置储能系统的风电场的外送功率因此得以增加，对于整个风电场群而言总体外送功率也得到了提升。

[0111] 图3展示了本地弃风能量小于储能额定容量、最大弃风功率小于储能额定功率的情况 ($E_{cur} < W_{rate}$ 且 $\max\{P_{cur}(t)\} < P_{rate}$)；在这个过程中，储能功率的变化经历了几个主要阶段； t_2 时刻风电场群整体开始弃风，储能系统在这时投入使用； $t_2 \sim t_3$ 时刻由于风电场k还没有弃风，所以储能系统的全部充放电功率都用于发挥外部性； $t_3 \sim t_4$ 时刻风电场k和风电场2都有弃风，所以储能系统既有自用的部分也有发挥外部性的部分； $t_4 \sim t_5$ 时刻由于风电场k不再弃风，储能系统重新回归只发挥外部性的工作状态，直到 t_5 时刻风电场群整体都不再弃风，储能系统停止工作； t 时刻的储能功率 $P_{ESS}(t)$ 整体按照风电场群总弃风功率大小 $P_{\Sigma cur}(t)$ 设定，达到额定功率限制 P_{rate} 以后保持额定功率大小；风电场2增加的发电功率 ΔP_2 变化趋势如图1中交叉线阴影部分所示， t_3 到 t_4 时段内功率值先下降后上升是由于储能系统充放电功率达到额定值 P_{rate} 约束，以及风电场k弃风功率 P_{curk} 逐渐增加联合构成了无储能系统风电场发电功率增加量上限；

[0112] 图4展示了本地弃风功率最大值高于储能额定功率的情况 ($\max\{P_{cur}(t)\} > P_{rate}$)；储能系统依旧在风电场群弃风开始的时刻 t_2 投入运行，弃风结束的時刻 t_5 退出运行；在 $t_3 \sim t_4$ 时段中，储能功率由于完全用于吸收风电场k本地弃风功率而没有任何剩余，因此这个时段内储能系统无法体现外部性， $P_{ESS}^{ext}(t)=0$ ；无储能系统风电场在 $t_3 \sim t_4$ 之间不会增加输出功率，输出功率维持原来的输电限额大小；

[0113] 图5展示了本地弃风电量超出储能额定容量的情况 ($E_{cur} > W_{rate}$)；储能系统在风电场群开始弃风的时刻 t_2 投入运行；在 $t_3 \sim t_4$ 的时段中，由于弃风电量 E_{cur} 比较大，在 t_4 时刻已经耗尽了储能系统的全部额定容量，因此储能系统在 t_4 时刻停止运行；风电场2从 t_3 时刻

开始便无法继续增加输出功率,其输出功率变化趋势如图所示;

[0114] 图6展示了当本地风电场不弃风时的情况 ($E_{cur}=0$);在这一过程中,储能系统依然会在风电场群弃风的时刻 t_2 投入运行,停止弃风的时刻 t_5 退出运行;储能的功率完全用于发挥外部性,即 $P_{ESS}(t)=P_{ESS}^{ext}(t)$;风电场2的增发情况如图中所示;

[0115] 为了进一步验证本控制策略的有效性,基于Matlab/Simulink仿真软件,构造了参数如表1所示的由两个风电场组成的简单风电场群;

[0116] 表1风电场参数

[0117]

风电场	储能/MW	装机容量/MW	最大功率/MW	输电功率限额/MW
风电场 1	5	49.5	52.6	47.6
风电场 2	0	49.5	51.4	46.4
风电场群	5	99		94

[0118] 两个风电场的装机容量都是49.5MW,而且由于储能的额定功率为5MW,因此两座风电场的输电功率限额都被设定在了最大值减去5MW的数值上,这样便保证了储能系统尽可能地得到充分利用;

[0119] 在这个场景下,令储能系统按照本发明所述的控制策略和普通控制策略进行工作,并进行了30天的仿真运算,最终得到了对比数据如表2中所示:

[0120] 表2控制策略效果对比 (30天)

[0121]

储能控制方式	弃风量/MWh	弃风减小量/MWh			循环次数/次
		风电场 1	风电场 2	总和	
无储能	438.83	0	0	0	0
普通控制方式	339.71	99.12	0	99.12	10.0
储能外部性控制方式	310.70	80.00	48.14	128.13	12.4

[0122] 从表2中可以看出,两种方法下储能系统对弃风的削减程度不一样;新控制策略对比过去的普通控制策略更为有效,相比之前多减少了29.01MWh的弃风量;而且,在相同30天的时间里储能系统的循环次数增加了2.4次,这意味着相同时间内储能系统的利用率提升了;

[0124] 本发明实施例中的计算条件、图例、表等仅用于对本发明作进一步的说明,并非穷举,并不构成对权利要求保护范围的限定,本领域技术人员根据本发明实施例获得的启示,不经过创造性劳动就能够想到的其它实质上等同的替代,均在本发明保护范围内。

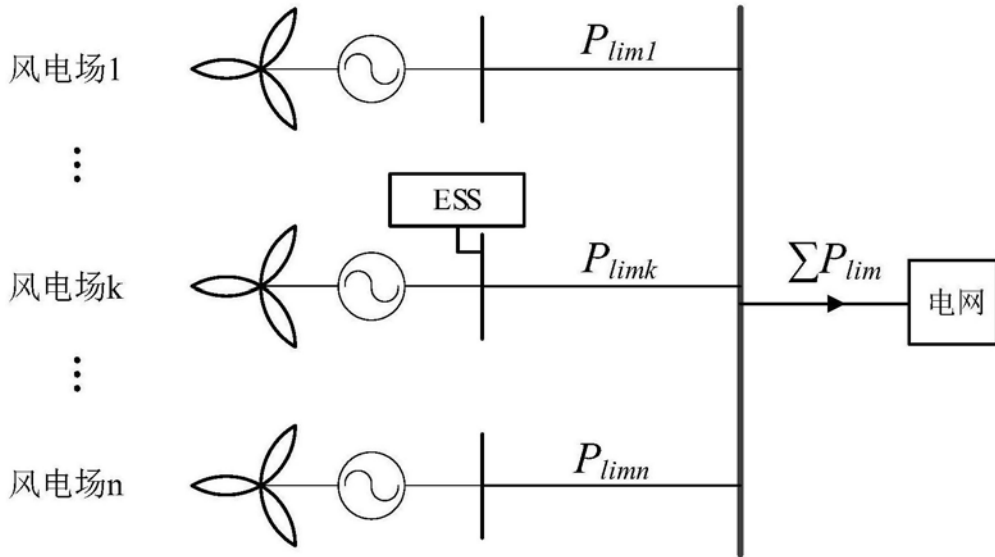


图1

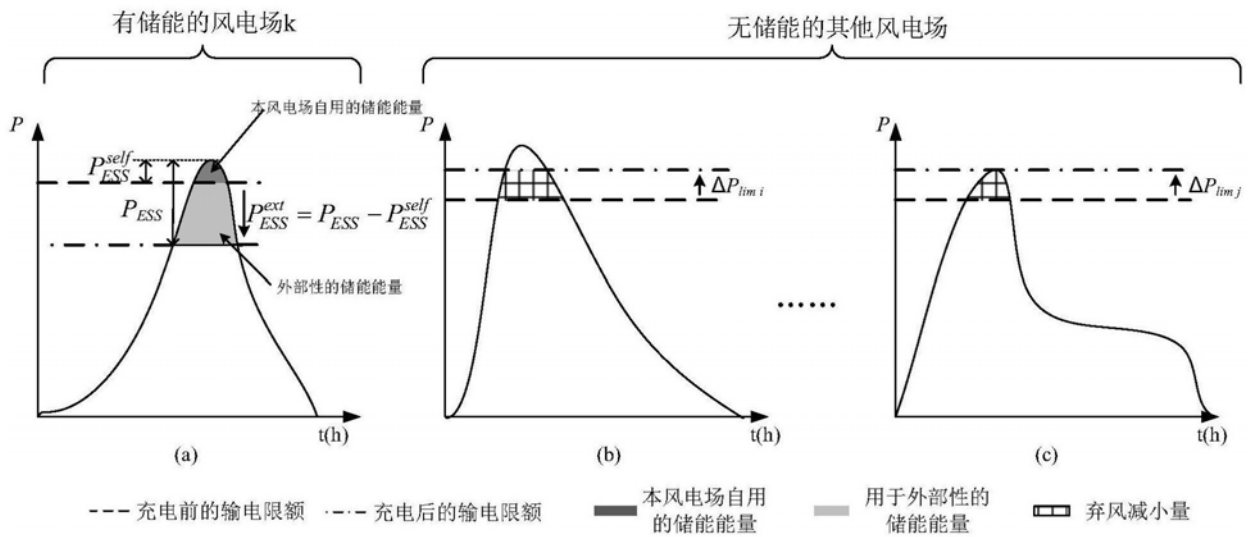


图2

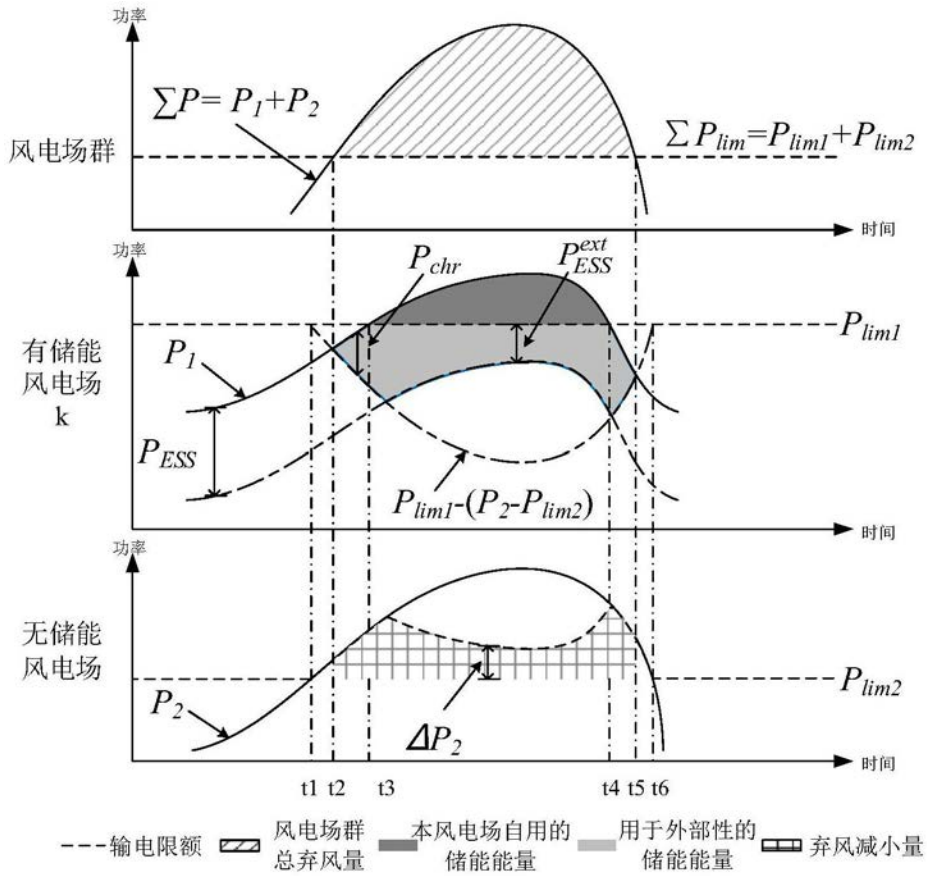


图3

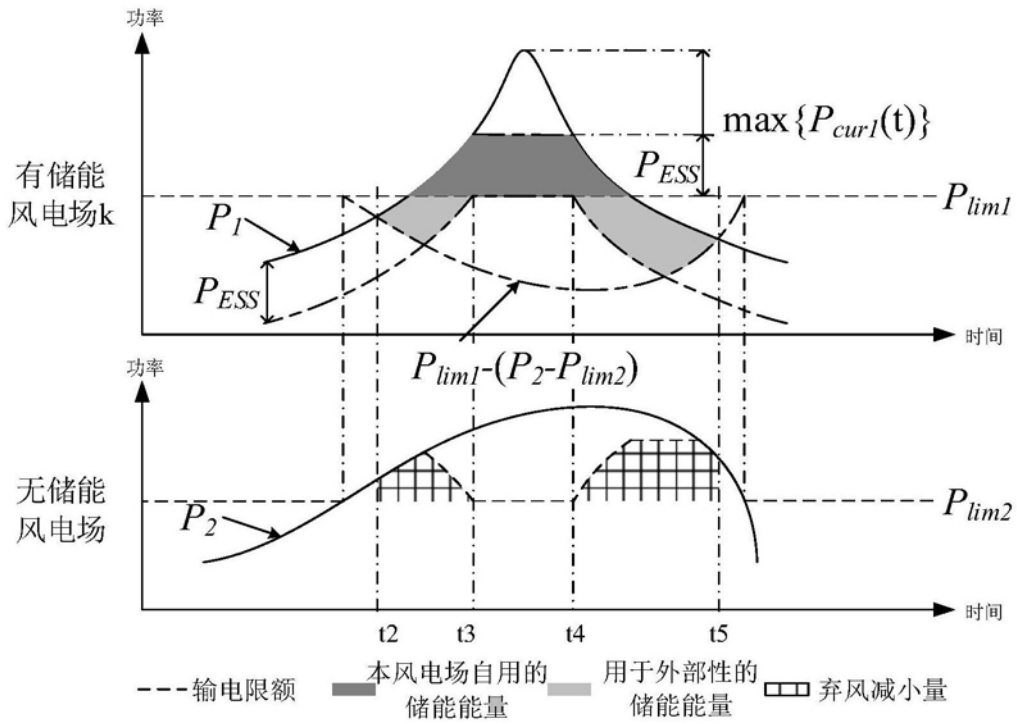


图4

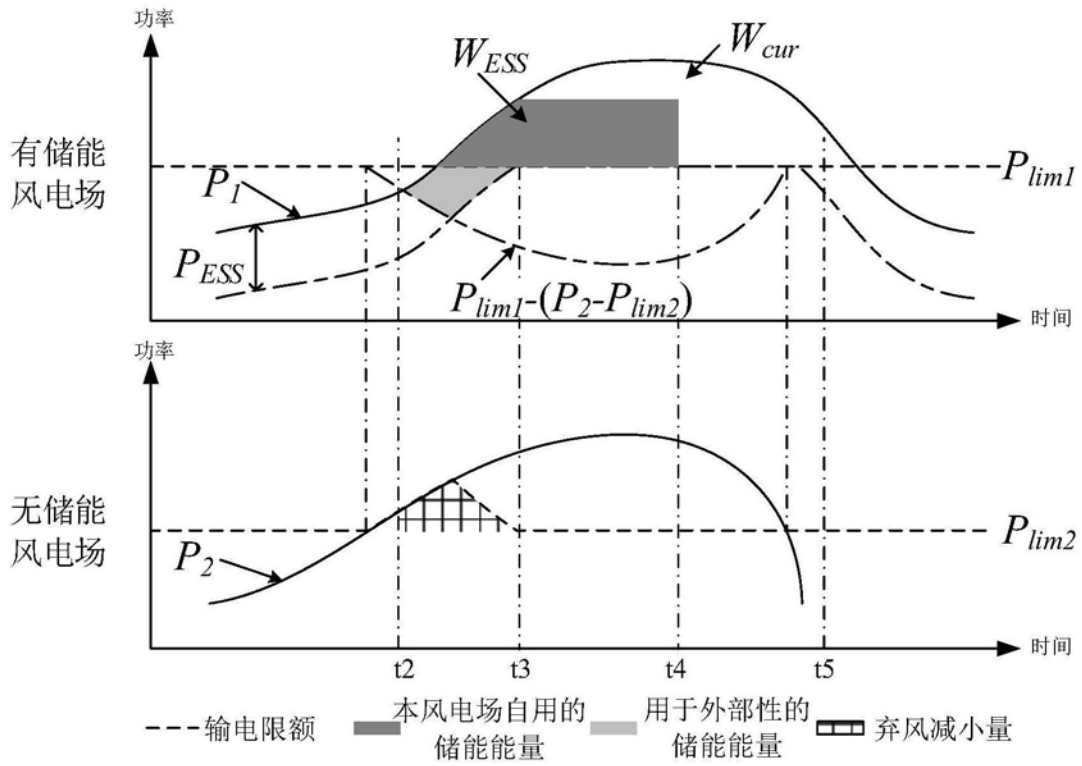


图5

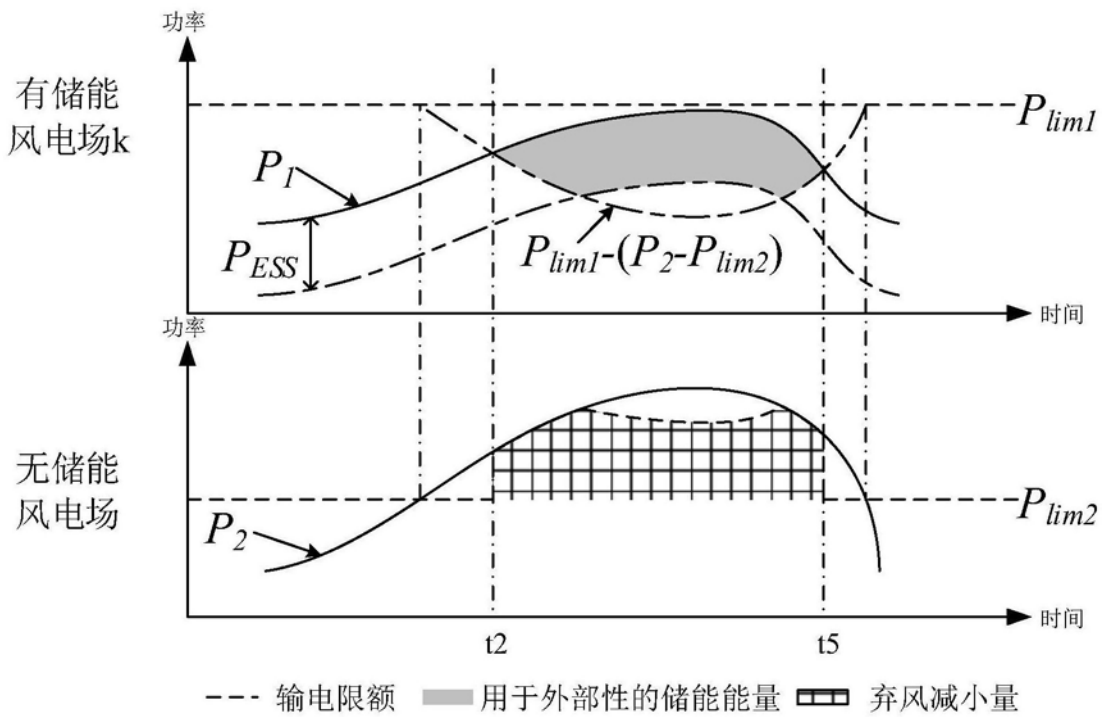


图6