

DOI: 10.7667/PSPC171105

基于超导磁储能系统的微电网频率暂态稳定控制策略

刘洋¹, 王倩¹, 龚康², 樊迪¹, 王峰¹, 苏国强¹, 孙勇¹, 李立生

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250002; 2. 国网宜昌供电公司, 湖北 宜昌 443000)

摘要: 微电网作为智能电网的重要组成部分, 具有并网运行和孤网运行两种运行模式。由于微电网的惯性很小, 模式切换过程或孤网下大的负荷投切都会对微电网的频率稳定性造成影响。针对这两种情形, 研究超导磁储能系统(SMES)在微电网频率暂态稳定控制中的应用。首先对比分析了超级电容与 SMES 的性能参数, 明确两种储能装置的差别, 然后设计了基于虚拟惯量的 SMES 控制策略、基于模糊控制的超导磁体电流调整策略与 SMES 容量配置策略。SMES 作为微电网的能量缓冲器改善微电网频率的暂态稳定特性。同时, 优化调整超导磁体的电流水平, 使 SMES 能够处于最佳的能量/功率水平。仿真算例结果验证了所设计控制策略、电流调整策略与容量配置策略的有效性。
关键词: 微电网; 超导磁储能系统; 频率暂态稳定; 虚拟惯量; 模糊控制

Transient stability control strategy of microgrid frequency based on SMES

LIU Yang¹, WANG Qian¹, GONG Kang², FAN Di¹, WANG Feng¹, SU Guoqiang¹, SUN Yong¹, LI Lisheng¹

(1. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250002, China;

2. State Grid Yichang Power Supply Company, Yichang 443000, China)

Abstract: Micro-grid, as an important part of smart grid, has two operation modes: grid-connected and isolated. Since the inertia of micro-grid is very small, the transient frequency characteristic of micro-grid will be greatly affected when operation modes switch or high load switches under isolated mode. For these two cases, this paper gives the application of Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) in micro-grid for transient stability control of micro-grid frequency. Firstly, the comparison of super-capacitor and SMES is conducted and the differences of them are clarified, then SMES control strategy based on virtual inertia, current regulation strategy of superconducting (SC) magnet based on fuzzy control and capacity allocation strategy of SMES are designed. SMES, as an energy buffer, can help to improve the transient stability of micro-grid frequency and make SC magnet current at an optimized energy/power level. Simulation results have validated the effectiveness of the proposed control strategy, current regulation strategy and capacity allocation strategy of SMES.

This work is supported by Program of State Grid Shandong Electric Power Company (No. 520626160010).

Key words: micro-grid; SMES; frequency transient stability; virtual inertia; fuzzy control

0 引言

随着微电网技术的不断发展, 各种分布式电源广泛接入微电网, 以充分发挥其效能, 具有重大经济和社会效益^[1-2]。由于光伏、风电等分布式电源具有间歇性、多变性、不确定性的特点, 且这些分布式电源对于提高微电网系统惯性的作用较小^[3], 微电网中功率的输入与输出处于动态的不平衡状态, 导致频率和电压波动, 影响微电网的频率和电压稳定性^[4]。特别是当微电网出现模式切换、大负荷投

切、分布式电源出力急剧变化等情形时, 都会出现瞬时的功率差额, 造成频率剧烈波动, 影响微电网的安全稳定运行。

文献[5]针对切负荷瞬间交流微电网电压及频率会偏离正常值的问题, 结合对蓄电池的控制, 提出了基于功率平衡的微电网稳定控制策略。文献[6]研究微电网孤岛运行模式下参数可自动调整的调频控制器, 使微电网频率保持稳定。文献[7]针对孤岛型微电网的稳定运行问题, 提出了基于频率电压分区控制的微电网运行控制策略, 利用储能的出力, 实现对频率波动的平抑。文献[8]针对接入大量分布式电源的微电网, 提出了虚拟子微电网频率、电压

快速稳定控制策略,实现多子微电网同步调节控制。文献[9]针对以纯逆变器为接口的微电网,考虑到频率难以直接反映系统功率的不平衡度,提出了基于公共母线电压的孤网下垂控制策略,实现对各分布式电源的灵活功率分配,保证微电网的安全稳定运行。

结合上述分析,本文研究超导磁储能系统在改善微电网频率稳定性中的作用。设计了基于虚拟惯量的 SMES 上层控制策略来控制 SMES 的出力,提高微电网运行时的频率稳定性。在保证超导磁体热稳定性前提下,为了保证 SMES 的功率响应水平,应使超导磁体的电流维持在一定的水平。基于此,设计了基于模糊控制的电流调整策略对超导磁体电流进行动态调节。最后,通过搭建微电网仿真平台,对上述 SMES 应用情形进行仿真分析,验证了所设计控制策略的有效性。

1 含 SMES 的微电网拓扑及逆变器控制

1.1 SMES 与超级电容器性能对比

SMES 与超级电容在性能上均属于快速功率响应型储能装置(ES)。但通过全面的性能参数对比可以发现二者在性能上的差异^[10-11]: 1) SMES 具有更高的能量效率,较低的自放电率,较低的运行损耗,且 SMES 每单位功率的成本要比超级电容低。因此,高功率低容量应用场合 SMES 具有更多的优势。2) SMES 与超级电容配套的双向 DC/DC 变换器拓扑如图 1 所示。SMES 用 DC/DC 变换器比超级电容用 DC/DC 变换器少一个滤波电感,同一功率水平下,其损耗和装置体积都要比超级电容的小,这样有利于 SMES 的模块化和小型化。而且,随着低温电力电子技术的发展,SMES 用 DC/DC 变换器可以整合到超导磁体所处的低温环境中,可以更进一步减小 SMES 待机时的损耗^[12],从而提高整套 SMES 装置的性能和效率。3) 每个超级电容单体的电压在 2.5~3 V,整套超级电容储能装置的额定电压和容量

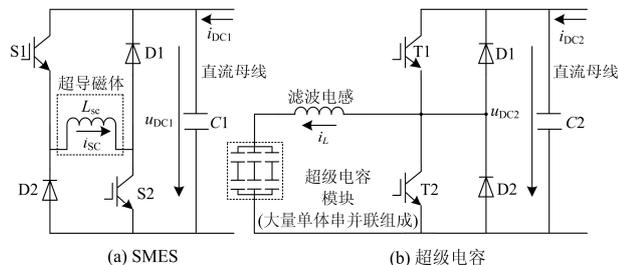


图 1 储能装置用双向 DC/DC 变换器拓扑

Fig. 1 Topology of DC/DC converter used for ES

是通过大量超级电容单体串并联来实现的^[13]。考虑到储能装置的可靠性和安全性,整套超级电容储能装置的电压和容量受到限制,超级电容在高压场合的应用也受到限制,而 SMES 已有高压场合应用的案例^[14]。

通过以上分析可知,SMES 在性能和成本上略优于超级电容,随着超导技术的不断发展,未来 SMES 无论在技术性还是在经济性上的优势都会越来越明显。因此,本文以 SMES 为研究对象,研究基于 SMES 的微电网频率暂态稳定控制策略,探索 SMES 潜在的应用场景。

1.2 基于虚拟惯量的 SMES 控制策略

微电网中的源、荷是分散的,分布在微电网的不同位置和节点上。本文设计了如图 2 所示的微电网拓扑,是一种并网型微电网,通过控制静态开关 K3 和 K4 的闭合和关断,来实现微电网运行模式的灵活切换。微电网中包括分布式可再生能源发电系统(光伏发电和风力发电)、燃料电池发电系统、储能电池、SMES 以及分散的负荷。按照图 2 所示的拓扑,进行微电网仿真平台搭建,各个模块采用的是详细模型。仿真时设置储能电池为锂电池,容量为 300 kWh。在图 2 给出的微电网的拓扑中,SMES 连接到微电网的交流母线上。

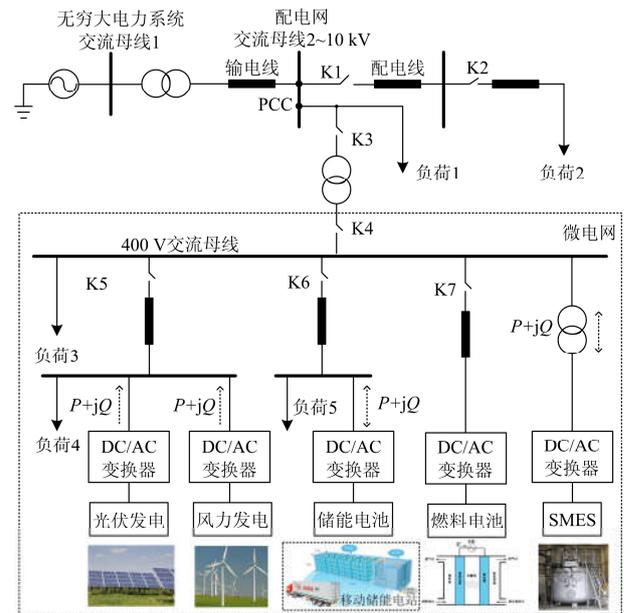


图 2 含 SMES 的交流微电网拓扑

Fig. 2 Topology of AC micro-grid including SMES

根据微电网中不同分布式电源的角色和作用,并考虑微电网的控制模式,其组成结构可分为主从结构和对等结构。主从结构的微电网中至少有一个主电源^[15-16]。对等结构微电网中的分布式电源无主

从之分,地位是对等的^[17-18]。本文采用主从控制结构,微电网并网运行时,其主、从分布式电源均采用P/Q控制;微电网“孤网”运行时,储能电池作为主电源建立交流母线的电压和频率,采用U/f控制^[19]。光伏发电系统、风力发电系统等从电源以及SMES均采用P/Q控制,目的是充分利用可再生能源,提高微电网运行的经济性。

通过在微电网中引入SMES增加微电网的惯性,提高微电网的动态频率稳定性。SMES又可与储能电池(站)构成复合储能系统,实现不同储能装置的各取所长与性能互补,改善储能装置的运行特性。

2 基于SMES的微电网频率暂态稳定控制策略设计

微电网的惯性很小,利用SMES并设计相应的控制策略,来增加微电网模式切换过程和孤网运行时的惯性,从而提高其频率稳定性。频率稳定控制的核心本质是微电网内功率的平衡和重新分配^[20]。SMES本身还可输出可控的无功,也可参与微电网孤网下交流母线电压的稳定控制。本文主要针对有功功率进行控制,提高微电网运行的频率稳定性。SMES综合控制策略包括两部分,下面分别对基于虚拟惯量^[21-22]的SMES控制策略和超导磁体电流调整策略进行设计。

2.1 基于虚拟惯量的SMES控制策略

微电网运行过程中须满足能量/功率平衡,如式(1)。

$$P_{\text{grid}} + P_{\text{PV}} + P_{\text{Wind}} + P_{\text{FC}} = P_{\text{Bat}} + P_{\text{SMES}} + P_{\text{Load}} \quad (1)$$

式中, P_{grid} 、 P_{PV} 、 P_{Wind} 、 P_{FC} 、 P_{Bat} 、 P_{SMES} 、 P_{Load} 分别为配电网输入微电网功率、光伏发电输出功率、风力发电输出功率、燃料电池发电系统的输出功率、储能电池吸收的功率、SMES吸收的功率以及负荷消耗的功率。在电力系统中,发电机转动惯量对其动态特性的影响一般采用惯量常数 H 来表征,其定义的表达式为

$$H = \frac{E_{\text{ks}}}{S_{\text{N}}} = \frac{J\omega_{\text{s}}^2}{2S_{\text{N}}} \quad (2)$$

式中: S_{N} 为发电机的额定容量; E_{ks} 为发电机在额定转速时的转子动能; ω_{s} 为发电机额定转速; J 为发电机的转动惯量^[23]。类比传统电力系统中频率变化率与功率缺额的关系,在微电网孤网运行模式下,满足如下关系^[24]。

$$\frac{2H}{f_{\text{N}}} \frac{df(t)}{dt} = \Delta P_{\text{MG}} \quad (3)$$

式中: H 为微电网的等效转动惯量; f_{N} 为微电网额

定运行频率; ΔP_{MG} 为微电网交流母线上的功率缺额。对式(3)进行演化得到

$$H_{\text{m}} \frac{df(t)}{dt} = \frac{2H}{f_{\text{N}}} \frac{df(t)}{dt} = \Delta P_{\text{MG}} = P_{\text{DGs}} - P_{\text{Loads}} - D_{\text{m}} \Delta f \quad (4)$$

式中: $H_{\text{m}}=2H/f_{\text{N}}$ 定义为微电网等效转动惯量系数; D_{m} 为微电网的阻尼系数; P_{DGs} 为所有微电源的输出功率; P_{Loads} 为所有负荷消耗的功率; Δf 为频率偏差量。

在微电网由并网模式切换到孤网运行模式后,对SMES的功率控制采用比例微分(PD)控制,即令

$$P_{\text{SMES}}^* = K_{\text{p}} \Delta f + K_{\text{D}} \frac{df(t)}{dt} \quad (5)$$

令 $K_{\text{p}}=D_{\text{s}}$, $K_{\text{D}}=H_{\text{s}}$,将式(3)代入到式(2)中可得

$$(H_{\text{m}} + H_{\text{s}}) \frac{df(t)}{dt} = P_{\text{DGs}} - P_{\text{Loads}} - (D_{\text{m}} + D_{\text{s}}) \Delta f \quad (6)$$

从式(6)可知,引入比例微分控制后,微分系数项 K_{D} 增大了微电网整体等效惯量系数 H_{total} ,比例系数项 K_{p} 增大了微电网的整体阻尼系数 D_{total} ,从而改善微电网的频率稳定性,即引入SMES后,微电网的惯性响应表达式变为

$$H_{\text{total}} \frac{df(t)}{dt} = P_{\text{DGs}} - P_{\text{Loads}} - D_{\text{total}} \Delta f \quad (7)$$

类比传统同步发电机组,当微电网出现频率跌落时,微电网“机组”释放“转子”中存储的“动能”,微电网“机组”增发与微电网频率变化率成比例关系的有功出力,增大“机组”惯量系数,降低微电网频率变化率;当微电网出现频率偏差时,微电网“机组”根据频率的偏差情况,按照与频率偏差的比例关系调整有功出力,增大“机组”阻尼系数,降低频率偏差量,直至微电网频率恢复至50Hz(在满足国标的情况下,允许微电网频率在小范围内波动)。此时,微电网的“机组”为微电网分布式电源、储能电池和SMES装置的综合体。考虑快速功率响应特性,SMES装置中存储的能量相当于“转子”中存储的“动能”。微电网的能量管理系统能够对微电网运行模式切换瞬间的能量/功率缺额进行评估,可以将评估量作为功率前馈补偿量 $\Delta P_{\text{Feedforward}}$ 直接加入到SMES的功率控制中。综上,引入SMES可以减小 ΔP_{MG} ,从而减小微电网频率的变化率 df/dt ,并进一步减小频率变化幅值 Δf ,即在微电网运行时,通过引入SMES增加了微电网的“虚拟惯量”。

2.2 基于模糊控制的超导磁体电流调整策略

在对150kJ SMES装置^[25]进行实验调试的过程中,作者发现:为了保证SMES在功率交换时的功

率响应和可吸放的容量水平，超导磁体的电流不能过大也不能太小。工程上一般取 0.6~0.8 倍的超导磁体临界电流。本章通过设计模糊控制^[26-28]策略对超导磁体电流进行动态调整，使超导磁体电流动态维持在一个合理的水平，保证 SMES 的能量和功率响应水平。超导磁体温度是反映超导磁体热稳定性的重要参数。为了提高 SMES 的利用效率和安全性，SMES 在运行时，需要监测超导磁体的温度状态。超导磁体的温度又与超导磁体的交流损耗密切相关，而交流损耗的大小是与超导磁体电流的大小及变化率密切相关的。因此，结合作者实际 SMES 装置的研制及调试经验，本章以超导磁体电流 I 和超导磁体温度 T 作为输入进行模糊控制器的设计。模糊控制的控制框图如图 3 所示。

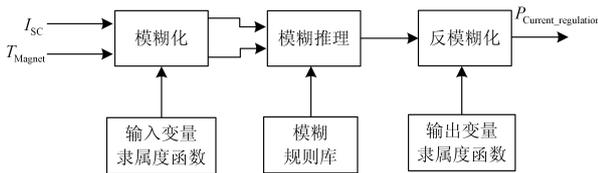
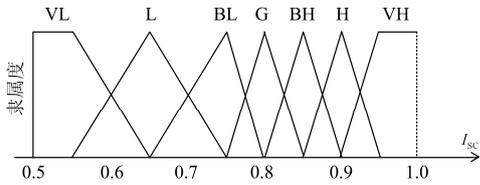


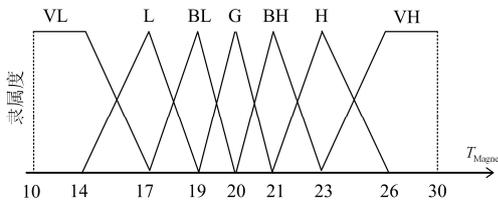
图 3 模糊控制框图

Fig. 3 Block diagram of fuzzy control

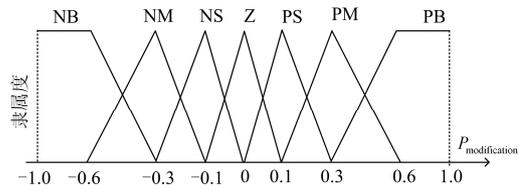
首先要确定输入变量和输出变量的隶属度函数。假设超导磁体的临界电流为 I_c ，为了保证 SMES 的功率响应水平，即保证 SMES 能够在一定容量范围内吸收或释放能量，需要超导磁体的运行电流不能够太小，一般设为 $0.6I_c$ 。如图 4(a)所示，超导磁体电流 I_{sc} 被划分为 7 种情形，分别是很低(VL)、低(L)、较低(BL)、好(G)、较高(BH)、高(H)和很高(VH)。VL 代表超导磁体电流非常低不满足要求；G 代表超导磁体电流处于一个比较合适的水平；BH 代表超导磁体电流偏高。



(a) 输入变量超导磁体电流 I_{sc} 的隶属度函数



(b) 输入变量超导磁体温度 T_{Magnet} 的隶属度函数



(c) 输出变量磁体电流调整功率的隶属度函数

图 4 模糊控制隶属度函数

Fig. 4 Membership function of fuzzy control

传导冷却 SMES 的运行温度一般在 20 K 左右，设定低温环境的最低温度为 10 K，上限温度阈值为 30 K。同样按照上述 7 种情形对超导磁体温度 T_{Magnet} 进行划分，如图 4(b)所示。图 4(c)给出了输出变量磁体电流调整功率的隶属度函数，同样划分为 7 种情形，即负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)和正大(PB)。另外，为了避免在超导磁体电流调整时出现脉冲电流，隶属度函数采用的是非线性隶属度函数。

模糊逻辑规则的确定主要依靠设计者对控制对象的认知和经验。本章在确定模糊逻辑规则时主要依靠的是作者在 SMES 装置实验调试过程中积累的经验以及对 SMES 超导磁体的深入认识。设计原则是根据超导磁体电流和温度的偏离情况来确定 SMES 的调整功率，以保证超导磁体电流和温度都处于一个比较合理的水平。

模糊逻辑的实现是通过判断温度和电流水平，然后给出调整功率的结果，通常以 If-Then 格式表达。当超导磁体的温度在 20 K 左右时，根据超导磁体的电流偏差来确定调整功率的大小。如果超导磁体的电流很小(VL)，调整功率就为正大(PB)，SMES 的输出功率就会减小或者 SMES 吸收功率。同样，如果超导磁体电流偏大(BH)，调整功率就为负小(NS)，SMES 的吸收功率就会减小或者 SMES 发出功率。当 SMES 完成一次功率交换之后，超导磁体的温度都会有明显的增大，此时为了保证超导磁体的热稳定性，应将超导磁体的温度状态作为评估调整功率大小的主要因素。同时还需将超导磁体电流的好(G)的状态设置值下调，以降低超导磁体的交流损耗，从而提高超导磁体的热稳定性。此时，调整功率应为负(N)，超导磁体释放能量，其电流会降至一个新的状态。在超导磁体的温度恢复至 20 K 左右时，恢复原有的超导磁体电流的好(G)状态设置值。如表 1 所示，如果超导磁体温度为较高(BH)，超导磁体电流为好(G)，调整功率应为负小(NS)，适当降低超导磁体电流水平。图 5 给出了模糊逻辑推理结果。在此需要注意的是，本章在设计基于模糊控制

的电流调整策略时, 对超导磁体电流和超导磁体电流调整功率采用的是标么值。因此, 在超导磁体电流调整策略中还需引入一个比例系数($P_{\text{modification}}$)以输出最终的电流调整功率。

表 1 模糊逻辑推理结果

Table 1 Results of fuzzy logic inference

超导磁体 温度	超导磁体电流						
	VL	L	BL	G	BH	H	VH
VL	PB	PB	PM	PS	Z	NS	NM
L	PB	PM	PS	Z	NS	NM	NB
BL	PB	PM	PS	Z	NS	NM	NB
G	PB	PM	PS	Z	NS	NM	NB
BH	NM	PS	Z	NS	NM	NB	NB
H	NS	Z	NS	NM	NB	NB	NB
VH	Z	NS	NM	NB	NB	NB	NB

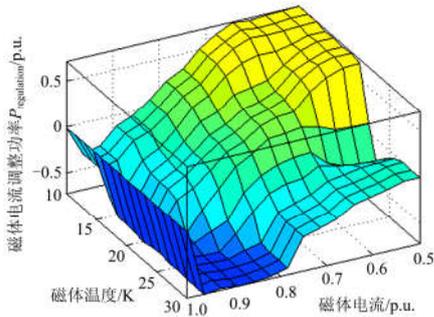


图 5 模糊逻辑推理结果

Fig. 5 Results of fuzzy logic inference

在考虑超导磁体的热稳定性时, 除了超导磁体温度 T_{Magnet} 外, 在模糊电流调整策略中还可以考虑另外两个变量(超导磁体温度变化量(dT/dt))以及温度变化量的变化量(d^2T/dt^2))来对超导磁体电流进行模糊调整。通过对超导磁体温度及温度变化率的变化趋势来判断超导磁体的热稳定性变化趋势。①若 dT/dt 大于零, 且 d^2T/dt^2 也大于零, 表示超导磁体的温度变化在不断增大, 有发生热失控(Thermal runaway)的危险; ②若 dT/dt 大于零, 但 d^2T/dt^2 小于零, 表示超导磁体的温度虽然在上升, 但上升的趋势越来越小, 超导磁体的温度应该会在某一个最大值后开始下降, 说明超导磁体的温度上升趋势得到了抑制。只要超导磁体温度在上升过程中不超过临界电流时就开始下降, 超导磁体就是热稳定的; ③若 dT/dt 小于零, 且 d^2T/dt^2 小于零, 表示超导磁体的温度得到了有效的控制, 超导磁体温度在加速降低, 超导磁体是热稳定的。

2.3 SMES 综合控制策略

对上面的基于虚拟惯量的 SMES 控制策略和基于模糊控制的超导磁体电流调整策略进行整合, 结

合功率前馈计算方法^[29], 做成单独的综合控制系统模块, 如图 6 所示, 最终形成一套 SMES 综合控制系统, 直接将其嵌入到微电网原有的能量管理系统 (Energy Management System, EMS) 中, 从而实现 SMES 的即插即用和无缝接入。

为了保证 SMES 的安全稳定运行, 在 SMES 综合控制系统中还须包括“超导磁体失超保护系统”: 当超导磁体温度、电流过高或者检测到超导磁体发生失超时, 应立即触发“失超保护系统”的释能电路导通, 进行能量泄放, 避免烧坏磁体, 保证超导磁体的安全。

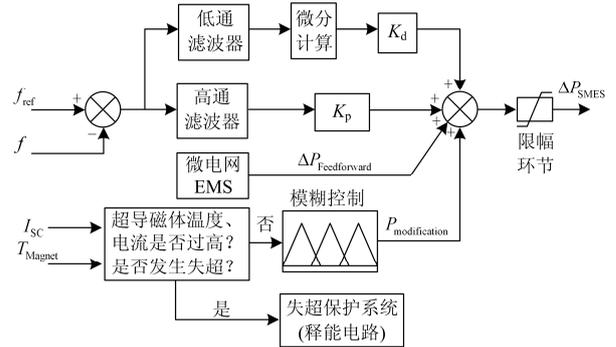


图 6 微电网中 SMES 综合控制框图

Fig. 6 Block diagram of SMES integrated control

2.4 SMES 容量配置策略

超导磁体作为 SMES 的核心部件本质上是一个大电感。在 SMES 吸收能量或释放能量过程中, 超导磁体电流会增大或减小, 但不会发生突变。且超导磁体中储存的能量和所能响应的最大瞬时功率是与超导磁体电流(I_{SC})和直流母线电压(U_{DC})密切相关的, 满足式(8)和式(9)。

$$E_{\text{SMES}} = 0.5 \cdot L_{\text{SC}} \cdot I_{\text{SC}}^2 \quad (8)$$

$$P_{\text{SMES}} = \min \{ P^*, U_{\text{DC}} \cdot I_{\text{SC}} \} \quad (9)$$

式中: E_{SMES} 为超导磁体储存的能量; L_{SC} 为超导磁体的电感; P_{SMES} 为 SMES 所能响应的功率; P^* 为控制策略计算出的 SMES 功率指令。SMES 所能响应的最大功率小于等于 $U_{\text{DC}} I_{\text{SC}}$ 。

微电网运行时的调频特性可由一阶惯性传递函数表示, 如式(10), 反映功率缺额与频率变化量之间的关系。

$$\frac{\Delta P_{\text{MG}}}{\Delta f} = \frac{K_{\text{p_MG}}}{1 + T_{\text{p_MG}} \cdot s} \quad (10)$$

式中: Δf 为微电网频率偏差; ΔP_{MG} 为微电网交流母线功率缺额; $K_{\text{p_MG}}$ 为微电网微电源发电增益; $T_{\text{p_MG}}$ 为微电网微电源发电系统的惯性时间常数。

根据式(5)和式(10)可知, 功率缺额满足式(11)。

$$\Delta P_{MG} = P_{SMES}^* + \Delta P_{Feedforward} = \frac{K_{p_MG}}{1 + T_{p_MG} \cdot s} \cdot \Delta f \quad (11)$$

在微电网运行模式切换或负荷投切过程中，交流母线上的能量偏差为

$$\Delta E = \int_{t_0}^t |\Delta P_{MG}| \cdot dt \quad (12)$$

式中： t_0 为模式切换时刻(或者负荷投切时刻)； t 为模式切换(或者负荷投切)完成时刻。

综合式(8)一式(12)，确立约束条件，通过设置不同的权重系数，得到优化的目标函数。基于粒子群(PSO)智能算法^[30-31]，考虑微电网暂态过程中功率/能量需求，计算得到 SMES 的最优化容量。

3 算例仿真分析

3.1 算例系统

在微电网运行过程中，应首先考虑对清洁可再生能源的利用。微电网并网运行时，主要利用风力发电和光伏发电，燃料电池等输出功率较小；孤网运行时，在利用可再生能源的同时，为了保证微电网负荷的稳定供电，燃料电池根据微电网能量管理系统的指令增大输出功率，即燃料电池在模式切换或者负荷投切过程中会根据功率缺额进行出力的调整。微电网详细的仿真参数如表 2，针对微电网并网/孤网模式切换与微电网孤网运行时负荷的投切这两种情形，进行了微电网仿真模型的搭建。通过仿真分析了 SMES 在这两种情形下对微电网频率特性的改善效果。

表 2 仿真参数设置

Table 2 Setting of simulation parameters

指标	参数
DG 直流母线电压	800 V
电网电压	380 V
电网频率	50 Hz
主逆变器滤波电感	3 mH
主逆变器滤波电容	10 μ F
风力发电	30 kW
光伏发电	100 kW
燃料电池	100 kW
锂电池	300 kWh
SMES	400 kJ/150 kW
负荷	260 kW

3.2 微电网不同工况下仿真分析结果

3.2.1 工况 1：并网/孤网运行模式切换

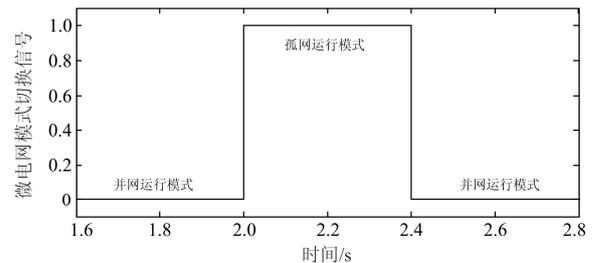
微电网并网运行时，微电网的频率是由大电网建立和调整的，此时微电网内的功率缺额由大电网提供。当微电网由并网运行切为孤网运行时，需要微电网自我建立交流母线(电压和频率)，瞬时的功

率缺额会严重威胁微电网的频率稳定性。

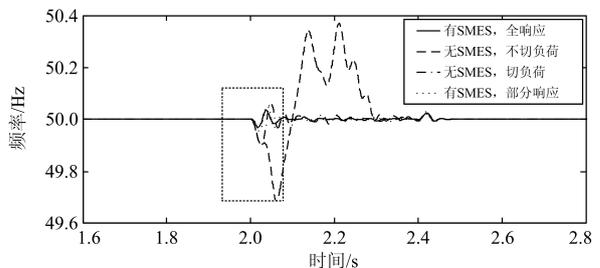
工况 1 所设置的具体工况为：①在 2 s 时，微电网由并网运行模式非计划切换为孤网运行模式，此时给燃气轮机发送指令，使其由较小功率输出的状态切换为额定功率输出状态。②在 2.4 s 时，微电网由孤网运行模式切换为并网运行模式。SMES 用于平衡模式切换过程中微电网交流母线上的能量不平衡。引入基于虚拟惯量的 SMES 控制就是为了增大微电网的惯性时间常数(式(10))，进而增强微电网的频率稳定性。

在微电网由并网运行切换为孤网运行后，交流母线电压频率变化曲线如图 7 所示。引入 SMES 后，微电网频率变化要比无 SMES 情况下变化的平稳，不会出现大范围的频率波动(无 SMES 时最大频率波动为 0.7 Hz)。而且，在 SMES 全响应时，微电网频率变化要比 SMES 部分响应时更加平滑，也就是说 SMES 的输出越大，微电网的惯性时间常数越大，频率稳定性越好，验证了引入 SMES 能够增大微电网的惯性。

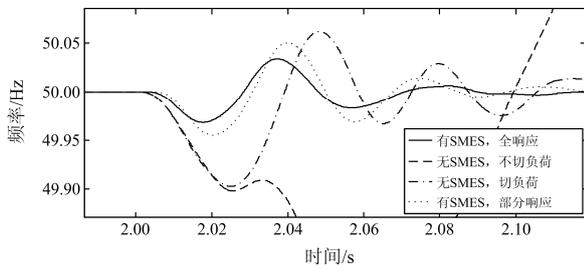
在不同情形下，储能电池输出的功率如图 7 所示。在无 SMES，切负荷的情形下，储能电池输出的功率最小，输出的能量(功率曲线对时间的积分)最小；在有 SMES，且 SMES 全响应时，储能电池输出的功率较小，输出的能量也较小；在无 SMES，也不切负荷的情况下，储能电池输出的功率最大，输出的能量也最大。通过 SMES 与储能电池构成了复合储能系统，既增大了整个储能系统能够响应的最大峰值功率，也使储能电池的充放电过程更加优化。微电网由孤网运行切换到并网运行时，由于配电网的惯性很大，切换过程中微电网的频率变化不大。



(a) 微电网运行模式切换控制信号



(b) 交流母线电压频率变化曲线-整体图

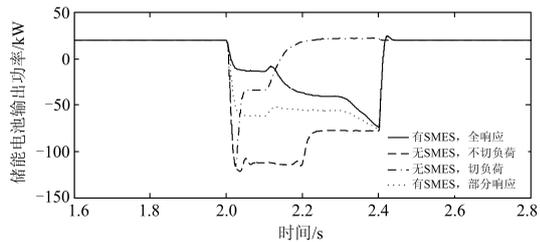


(c) 交流母线电压频率变化曲线-局部放大图

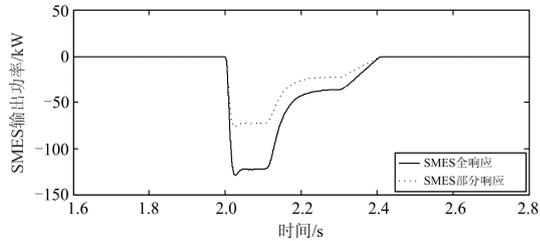
图 7 微电网模式切换过程中母线电压频率变化曲线

Fig. 7 Frequency variation curve of AC bus

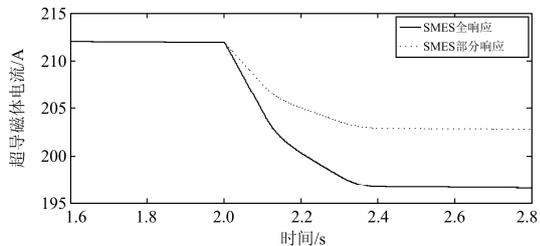
在 SMES 不同的功率响应情形下, SMES 输出功率和超导磁体电流波形如图 8 所示。与 SMES 全响应的情形相比, 在 SMES 部分响应情形下, SMES 输出功率要小, 超导磁体电流变化的幅值和变化率也要小。根据磁体交流损耗的产生机理^[32]可知, 在 SMES 部分响应情形下, 超导磁体交流损耗要小, 对应的磁体温升也就小, 超导磁体的热稳定性也就越好。但由图 7 可知, SMES 部分响应对微电网频率特性的改善效果要比 SMES 全响应的差一些。也就是说, 超导磁体的热稳定性与 SMES 对微电网频率特性的改善效果之间是“此消彼长”的关系。



(a) 储能电池输出功率曲线



(b) SMES输出功率曲线



(c) SMES超导磁体电流波形

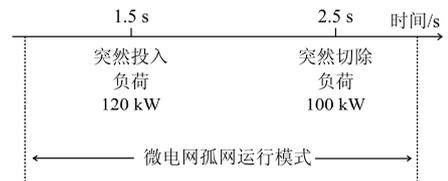
图 8 储能电池与 SMES 输出功率曲线

Fig. 8 Output power curve of battery and SMES

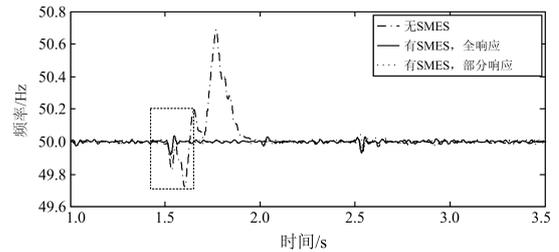
3.2.2 工况 2: 孤网运行模式下大负荷的投切

微电网孤网运行模式下, 大负荷的投切会产生大的瞬时功率差额, 而微电网由于惯性很小, 不能及时输出相应的功率进行调节。因此, 在孤网运行模式下, 微电网的频率控制具有相当大的难度。为了提高微电网频率稳定性, 引入 SMES 作为能量缓冲/平衡装置。微电网中微电源输出功率的突变同负荷的投切对微电网频率的稳定性具有相同的影响。

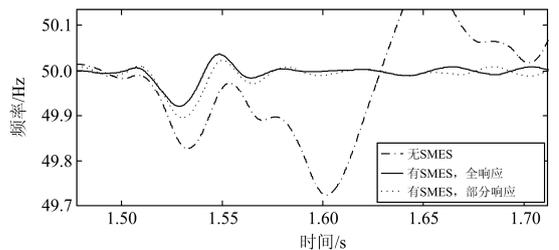
以大负荷投切为例, 在仿真时的具体设置如图 9(a)所示, 图 9(b)给出了在微电网孤网运行时, 交流母线电压频率的变化曲线。在 1.5 s 时投入 120 kW 负荷。无 SMES 时, 微电网交流母线电压的频率有一个较大的波动调整过程, 最大频率波动偏差值为 0.97 Hz; 引入 SMES 后, 频率波动明显减小。而且, SMES 全响应情形要比 SMES 部分响应情形的频率波动更加平稳, 频率最大波动量也要小一些。



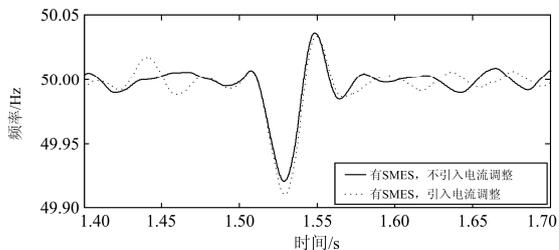
(a) 微电网孤网运行下工况设置



(b) 交流母线电压频率变化曲线-整体图



(c) 交流母线电压频率变化曲线-局部放大图



(d) 有无超导磁体电流调整时, 负荷投入时刻交流母线频率波形图

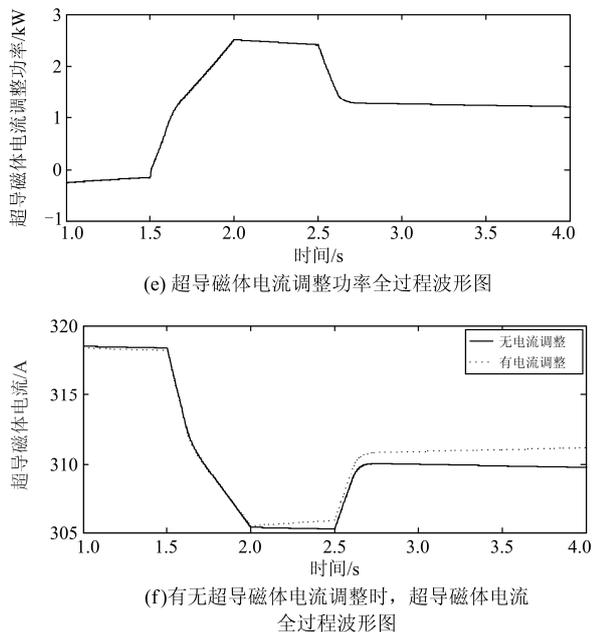


图9 微电网孤网运行模式下各个曲线

Fig. 9 Curves of microgrid at isolated operation mode

为了使 SMES 在应用时能够满足对能量和功率响应水平的要求, 设定超导磁体的额定运行电流在 315 A 左右(± 4 A), SMES 超导磁体运行温度区间设为(18~22 K), 在 SMES 整个运行过程中(SMES 全响应)对超导磁体电流进行模糊调整。加入超导磁体电流调整策略后, SMES 对微电网频率特性的改善效果以及 SMES 超导磁体电流和调整功率的仿真结果如图9(d)~图 9(f)所示。通过对仿真结果进行分析可知: 引入超导磁体电流调整策略后, 虽然会在一定程度上影响微电网的频率特性(如图 9(d)所示), 但通过电流调整, 超导磁体电流会不断接近额定运行电流(如图9(f)所示), 从而保证 SMES 的能量和功率响应水平, 证明了对 SMES 超导磁体电流进行调整的必要性以及所设计 SMES 综合控制策略的有效性。

从图 9(e)可以看出: 当超导磁体电流稍大于 315 A 时(1~1.5 s), 调整功率为负, 超导磁体电流减小; 当 SMES 接收功率指令开始放磁(1.5~2 s)时, 超导磁体电流不断减小, 调整功率由负变正并不断增大; 当 SMES 待机(2~2.5 s)时, 输出一个相对稳定的正功率对超导磁体进行充磁以增大电流; 当 SMES 接收功率指令开始充磁时, 调整功率减小, 但仍为一个正值, 超导磁体电流缓慢增大。超导磁体电流波形如图 9(f)所示, 与无电流调整情形相比, 在有模糊电流调整时, 超导磁体电流要大一些, 且更接近额定运行电流, 验证了模糊电流调整策略的有效性。

4 结论

本文针对微电网模式切换过程、微电网孤网运行时负荷投切两种情形, 引入 SMES 改善微电网运行时的频率特性, 提出了基于虚拟惯量的 SMES 控制策略, 基于模糊控制的超导磁体电流调整策略和 SMES 容量配置策略。仿真结果验证了所设计控制策略和调整策略的有效性, 并得出以下结论: 1) 对微电网频率控制的问题实际上就是对微电网功率不平衡度的控制问题。微电网由于不像传统电力系统那样具备旋转备用容量, 惯性很小。因此, 在微电网运行(特别是孤网运行时), 对微电网频率的稳定控制十分重要。可利用 SMES 等储能装置增大微电网的惯性, 以提高微电网的频率稳定性。2) 各种清洁可再生分布式微电源以及储能装置功率响应的时时间尺度不同, 在微电网负荷波动或者微电网其他动态过程中, 就会出现功率/能量的不平衡, 进而会影响微电网的频率稳定性。可利用具有快速响应特性的储能装置, 如 SMES 等, 减小功率不平衡过程的持续时间, 改善微电网的稳定性。3) 针对具体的 SMES 应用情形, 其功率响应水平和超导磁体的交流损耗是与超导磁体稳态电流的大小及电流变化率密切相关的。在相同的稳态电流下, 超导磁体电流的变化率越大, SMES 的功率响应水平就越高, 对应的交流损耗也越大, 而交流损耗最直接的反映就是超导磁体的温度状态。因此, 为了保证超导磁体的热稳定性, 就存在着 SMES 功率响应水平和超导磁体温度状态之间的平衡问题。

参考文献

- [1] 王鹤, 李国庆. 含多种分布式电源的微电网控制策略[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 19-23.
WANG He, LI Guoqing. Control strategy of microgrid with different DG types[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 19-23.
- [2] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.
- [3] 孟建辉, 石新春, 王毅, 等. 改善微电网频率稳定性的分布式逆变电源控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 70-79.
MENG Jianhui, SHI Xinchun, WANG Yi, et al. Control strategy of DER inverter for improving frequency stability of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 70-79.

- [4] 刘伟佳, 孙磊, 林振智, 等. 含间歇电源、储能和电动汽车的配电网孤岛短时恢复供电策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(16): 49-58.
LIU Weijia, SUN Lei, LIN Zhenzhi, et al. Short-period restoration strategy in isolated electrical islands with intermittent energy sources, energy storage systems and electrical vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(16): 49-58.
- [5] 樊一江, 尚飞艳, 张龙, 等. 基于功率平衡的微电网稳定性控制策略[J]. 工业仪表与自动化装置, 2017(2): 63-66.
FAN Yijiang, SHANG Feiyan, ZHANG Long, et al. Micro power grid stability control strategy based on power balance[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2017(2): 63-66.
- [6] 郭蕾, 苏建徽, 施永. 微网孤岛运行模式下的调频控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 110-115.
GUO Lei, SU Jianhui, SHI Yong. Frequency regulation control strategy for microgrid in islanded mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 110-115.
- [7] 许志荣, 杨苹, 郑成立, 等. 孤岛型风柴储微电网运行情况分析[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 1978-1984.
XU Zhirong, YANG Ping, ZHENG Chengli, et al. Operation analysis of isolated microgrid including wind turbine, diesel generator and battery storage[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 1978-1984.
- [8] 杨湛晔, 马红伟, 毛建容, 等. 基于虚拟子微网的独立微电网快速稳定控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1907-1912.
YANG Zhanye, MA Hongwei, MAO Jianrong, et al. Transient stability control strategy of island micro-grids based on virtual sub micro-grid[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1907-1912.
- [9] 吴翔宇, 沈沉, 赵敏, 等. 基于公共母线电压的微电网孤岛运行下垂控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(24): 135-141.
WU Xiangyu, SHEN Chen, ZHAO Min, et al. A droop control method based on PCC bus voltage in islanded microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(24): 135-141.
- [10] EVANS A, STREZOV V, EVANS T J. Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetration[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(6): 4141-4147.
- [11] BEAUDIN M, ZAREIPOUR H, SCHELLENBERGLABE A, et al. Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: an updated review[J]. Energy for Sustainable Development, 2010, 14(4): 302-314.
- [12] STEURER M, RIBEIRO P F, NOE M. Superconducting magnetic energy storage and fault current limiters-projects, considerations, and outlook[C] // Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2003 IEEE PES, September 7-12, 2003, Dallas, USA: 1102-1107.
- [13] KOUSKSOU T, BRUEL P, JAMIL A, et al. Energy storage: applications and challenges[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2014, 120: 59-80.
- [14] NAGAYA S, HIRANO N, KONDO M, et al. Development and performance results of 5 MVA SMES for bridging instantaneous voltage dips[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2004, 14(2): 699-704.
- [15] 邱麟, 许烈, 郑泽东, 等. 微电网运行模式平滑切换的控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 171-176.
QIU Lin, XU Lie, ZHENG Zedong, et al. Control method of microgrid seamless switching[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 171-176.
- [16] 陈新, 姬秋华, 刘飞. 基于微网主从结构的平滑切换控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 163-170.
CHEN Xin, JI Qiuhua, LIU Fei. Smooth transferring control method of microgrids based on master-slave configuration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 163-170.
- [17] 田梁玉, 唐忠, 田晨, 等. 基于状态跟随器的微电网平滑切换研究[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1285-1290.
TIAN Liangyu, TANG Zhong, TIAN Chen, et al. Research of microgrid seamless switching based on state follower[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1285-1290.
- [18] 陈丽丽, 牟龙华, 刘仲. 光储柴微电网运行特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 86-91.
CHEN Lili, MOU Xiaolong, LIU Zhong. Analysis of the operating characteristics of a PV-Diesel-BESS microgrid system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 86-91.
- [19] GUO Wenming, MU Longhua. Control principles of micro-source inverters used in microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 56-62. DOI: 10.1186/s41601-016-0019-8.
- [20] 缪勇, 奚玲玲. 微电网孤岛运行下的频率控制研究[J]. 电器与能效管理技术, 2015(2): 49-55, 64.
MIAO Yong, XI Lingling. Research on frequency control in islanded micro grid[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015(2): 49-55, 64.
- [21] SONI N, DOOLLA S, CHANDORKAR M C.

- Improvement of transient response in microgrids using virtual inertia[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1830-1838.
- [22] GU W, LIU W, SHEN C. Multi-stage under frequency load shedding for islanded microgrid with equivalent inertia constant analysis[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 46: 36-39.
- [23] 刘巨, 姚伟, 文劲宇. 一种基于储能技术的风电场虚拟惯量补偿策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1596-1605.
- LIU Ju, YAO Wei, WEN Jingyu. A wind farm virtual inertia compensation strategy based on energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1596-1605.
- [24] 王波, 张保会, 郝治国. 基于功率监测和频率变化率的孤岛微电网紧急切负荷控制[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 33-37.
- WANG Bo, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo. Emergency load shedding control for islanded microgrid based on power monitoring and rate of frequency change[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 33-37.
- [25] 徐颖, 任丽, 唐跃进, 等. 150 kJ/100 kW 直接冷却高温超导磁储能系统[J]. 储能科学与技术, 2015, 4(4): 394-401.
- XU Ying, REN Li, TANG Yuejin, et al. A 150 kJ/100 kW directly cooled high temperature superconducting electromagnetic energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2015, 4(4): 394-401.
- [26] WANG S, JIN J. Design and analysis of a fuzzy logic controlled SMES system[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24(5): 1-5.
- [27] GONG K, SHI J, LIU Y, et al. Application of SMES in the microgrid based on fuzzy control[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(3): 126-132.
- [28] 蒋小平, 彭朝阳, 魏立彬, 等. 基于模糊控制的混合储能平抑风电功率波动[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 126-132.
- JIANG Xiaoping, PENG Chaoyang, WEI Libin, et al. Hybrid energy storage for smoothing wind power fluctuations based on fuzzy control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 126-132.
- [29] 姚莉娜, 杨东海, 段运鑫, 等. 微电网离网运行有功缺额计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 137-144.
- YAO Lina, YANG Donghai, DUAN Yunxin, et al. A calculation method of active power shortage in off-grid microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 137-144.
- [30] MORADI M H, ESKANDARI M, HOSSEINIAN S M. Operational strategy optimization in an optimal sized smart microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(3): 1087-1095.
- [31] WANG J, YANG F. Optimal capacity allocation of standalone wind/solar/battery hybrid power system based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. IET Renewable Power Generation, 2013, 7(5): 443-448.
- [32] 张晶晶, 李敬东, 唐跃进. 高温超导带材交流损耗的数值计算与分析[J]. 低温与超导, 2006, 34(6): 456-458.
- ZHANG Jingjing, LI Jingdong, TANG Yuejin. Numerical calculation and analysis of AC loss in high temperature superconducting tapes[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2006, 34(6): 456-458.

收稿日期: 2017-07-24; 修回日期: 2017-09-26

作者简介:

刘洋(1988—), 男, 通信作者, 博士, 工程师, 研究方向为储能技术在电力系统中的应用、微电网及配电网运行控制技术。E-mail: hust_liuyang@hust.edu.cn

(编辑 葛艳娜)