# 计及源-储-荷功率特性的飞轮储能系统容量配置方法

王育飞,王成龙,薛 花,徐文法 (上海电力大学 电气工程学院,上海 200090)

摘要:在电动汽车直流快充站的应用场景下,以限制电网功率爬坡率并补偿母线电压跌落为目标,提出计及 源-储-荷功率特性的飞轮储能系统容量配置方法。首先,根据源-储-荷的功率关系得到飞轮机械角速度增 量与母线电压跌落幅值之比近似为时间的函数;根据快充站内电网侧变流器的功率特性,推导得到电网最大 功率爬坡率与母线电压最大跌落幅度之间近似呈正比关系。然后,针对额定功率不同的快速充电负荷,在满 足直流母线电压等级与永磁同步电机电磁约束条件的基础上,重点探讨飞轮转子转动惯量与初始机械角速 度的设定,并且分析了飞轮侧储能变流器的容量约束条件。最后,在MATLAB/Simulink中搭建系统的仿真 模型,验证所提飞轮储能系统容量配置方法的正确性。

关键词:电动汽车;直流快充站;飞轮储能系统;电网功率爬坡率;母线电压;转动惯量;机械角速度;容量配置;功率特性

中图分类号:TM 73;TM 910.6;U 469.72

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201912005

## 0 引言

近年来,随着电动汽车快速充电技术的普及,越 来越多的电动汽车快充站在城市核心区域投入建设 与运营。快充站负荷具有功率大与随机性强的特 点,可对电网造成强烈功率冲击,影响电力系统的安 全稳定运行<sup>[1-3]</sup>。目前,电动汽车快充站大多采用交 流母线供电方式,快速充电机并联接入交流母 线<sup>[45]</sup>。为了方便储能装置接入,平抑快速充电引发 的功率冲击效应,科研人员在交流母线供电方式的 基础上研究了储能式直流快充站 DC-FCS(DC Fast Charging Station)<sup>[6-7]</sup>,储能装置经由变流器接入直流 母线。

DC-FCS的负荷冲击特性主要体现在充电启动 后的初始阶段,母线电压也会在此期间发生大幅度 跌落<sup>[8-10]</sup>。实现抑制功率冲击以及补偿母线电压跌 落的储能装置应具备以下特性:①在快速充电启动 时刻,储能系统能够快速响应控制策略,通过直流母 线向电动汽车负荷提供充电功率;②储能系统的容 量配置应满足短时间内充电负荷的能量需求。

文献[11-14]在DC-FCS场景下应用飞轮储能系统FESS(Flywheel Energy Storage System)限制快速充电初始阶段的电网功率爬坡率,并在此基础上对FESS的容量配置问题进行了一定程度的研究。文献[11]构建了光储式电动汽车直流充电站结构,

## 收稿日期:2019-03-27;修回日期:2019-10-10

基金项目:上海市科技创新行动计划项目(19DZ2204700);上 海市科委地方能力建设计划项目(16020500900)

Project supported by Shanghai Science and Technology Innovation Action Plan(19DZ2204700) and Shanghai Municipal Science and Technology Commission's Local Capacity Construction Plan(16020500900) FESS 受直流母线电压分层控制策略的影响,平滑功 率高频分量,其最大放电功率为10kW,机械转速范 围为5000~10000 r/min。文献[12]在考虑车载电 池恒流与恒压充电功率特性曲线的前提下,对飞轮转 子转动惯量的选择进行了研究。FESS采取矢量控制 策略,最大放电功率为37.7 kW,所存储的动能为 34.17 W·h,初始机械转速设定为1500 r/min,可满 足对电网功率缓冲的需要。文献[13]中模拟电动汽 车快速充电负载的实验平台功率缩小为实际快速充 电功率的5%,FESS的最大放电功率为0.676 kW,储 能容量为1.4 W·h,飞轮初始机械转速为1500 r/min。 文献[14]考虑在DC-FCS中配备大容量飞轮储能装 置,在实现对电网功率有效缓冲的基础上提出一种 兼顾经济效益的储能容量配置方法,FESS的最大额 定功率为250 kW,储能最大容量为127.4 kW·h,机 械转速为8400 r/min。上述文献在对FESS的容量 进行配置时,均未依据具体控制策略提供较为详细 的转动惯量与机械转速参数的设定步骤。

研究永磁同步电机式飞轮储能系统(PMSM-FESS)的容量优化配置问题具有重要的意义:若储 能容量配置不足,FESS将无法有效地发挥对电网的 功率缓冲作用;若储能容量配置裕度过大,将会造成 储能资源的浪费<sup>[15]</sup>。本文在PMSM-FESS采用负载 电流补偿与转速反馈控制LCC-SFC(Load Current Compensation and Speed Feedback Control)策略的 前提下,提出计及源-储-荷功率特性的PMSM-FESS 容量优化配置方法。该方法在实现对电网功率缓冲 与补偿母线电压跌落的基础上,通过对飞轮转子转 动惯量与初始机械角速度值的整定,以及对飞轮侧 变流器(FSC)容量选取的分析,为实现PMSM-FESS 容量的优化配置提供了参考。

## 1 配有 PMSM-FESS 的 DC-FSC 系统特性分析

## 1.1 LCC-SFC 策略分析

120

配有 PMSM-FESS 的电动汽车 DC-FCS 的控制系统结构见附录中图 A1。电网侧变流器(GSC)与 FSC 并联接入直流母线。两者均为三相全桥结构,其中 GSC 采用传统的"电压-电流"双闭环控制方式<sup>[16]</sup>; FSC 采用LCC-SFC 策略。为了模拟快速充电对电网的功率冲击效应,采用恒值电阻替代电动汽车负荷, 开关S于  $t_0$ 时刻闭合,代表启动快速充电。忽略电 网电压 d 轴分量  $E_{Gd}$  的波动,t时刻对应的负载实时 充电功率  $P_{Load}$ 、电网功率  $P_{Grid}$  以及 PMSM-FESS 提供的功率  $P_{Flv}$ 可表示为:

$$\begin{cases} P_{\text{Load}} = (v_{\text{dc-ref}} - \Delta v_{\text{dc}(t)})^2 / R_{\text{L}} \\ P_{\text{Grid}} = \frac{3}{2} E_{\text{Gd}} \left( K_{\text{gp}} \Delta v_{\text{dc}(t)} + K_{\text{gi}} \int_{t_0}^{t} \Delta v_{\text{dc}(t)} dt \right) \\ P_{\text{Fly}} = (v_{\text{dc-ref}} - \Delta v_{\text{dc}(t)}) \left[ \left( K_{\text{fp}} \Delta v_{\text{dc}(t)} + K_{\text{fi}} \int_{t_0}^{t} \Delta v_{\text{dc}(t)} dt \right) - (1) \right] \\ \left( K_{\omega p} \Delta \omega_{m(t)} + K_{\omega i} \int_{t_0}^{t} \Delta \omega_{m(t)} dt \right) + \frac{v_{\text{dc-ref}} - \Delta v_{\text{dc}(t)}}{R_{\text{L}}} \end{bmatrix}$$

其中, $v_{de-ref}$ 、 $\Delta v_{de(t)}$ 、 $\Delta \omega_{m(t)}$ 分别为母线电压额定值、母 线电压在 $t(t \ge t_0)$ 时刻的增量、飞轮机械角速度在  $t(t \ge t_0)$ 时刻的增量; $R_L$ 为负载的等效电阻值; $K_{gp}$ 、  $K_{gi}$ , $K_{fp}$ 、 $K_{fi}$ , $K_{op}$ 、 $K_{oi}$ 分别为GSC的电压控制外环、 LCC-SFC电压外环以及转速控制环的PI参数。

不考虑稳压电容的瞬时输出功率,同时忽略 GSC、FSC及线路损耗,则直流母线功率流可表示为:

$$P_{\text{Load}} = P_{\text{Grid}} + P_{\text{Fly}} \tag{2}$$

将式(1)代入式(2),忽略 $\Delta v_{de(t)}$ 与 $\Delta \omega_{m(t)}$ 的乘积 项,由于充电初始阶段的时间较短,将积分项近似处 理为被积分函数与积分区间的乘积,可得到:

$$\frac{\Delta v_{\rm dc(t)}}{\Delta \omega_{\rm m(t)}} = \frac{v_{\rm dc-ref} [K_{\rm op} + K_{\rm oi} (t - t_0)]}{v_{\rm dc-ref} [K_{\rm fp} + K_{\rm fi} (t - t_0)] + 3E_{\rm Gd} [K_{\rm gp} + K_{\rm gi} (t - t_0)]/2}$$
(3)

式(3)表明,*t*时刻对应的电压跌落幅值与飞轮 机械角速度变化量之比近似为时间的函数,二者的 比值还与电压额定值以及相应的PI参数有关。

#### 1.2 DC-FCS系统功率特性分析

直流母线电压 $v_{dc}$ 、FESS 机械角速度 $\omega_m$ 与DC-FCS系统功率特性曲线如图1所示(图中 $v_{dc}$ 的单位 为 $V, \omega_m$ 的单位为rad/s, 功率的单位为kW)。图中  $\Delta v_{dc-max}$ 为电压最大跌落幅值,并将此时刻记为 $t_1$ ,此 时对应的机械角速度记为 $\omega_{m(t_1)}$ ;将飞轮机械角速度 跌落到最大幅值 $\Delta \omega_{m-max}$ 对应的时刻记为 $t_2$ ,此时的 机械角速度记为 $\omega_{m(t_2)}$ ;将FESS在 $t_0-t_1$ 与 $t_0-t_2$ 时段 内释放的动能分别记为 $\Delta E_{Fy1}$ 与 $\Delta E_{Fy2}$ 。



Fig.1 Characteristic curves of  $v_{dc}$ ,  $\omega_m$  and DC-FCS system power

电动汽车负载于 $t_0$ 时刻启动快速充电,FESS向 负载提供瞬时充电功率,故其功率配置应满足快速 充电负载的功率需求。电网功率以近似恒定的爬坡 率从0开始缓慢上升。至 $t_1$ 时刻电网功率曲线与飞 轮功率曲线相交,母线电压跌落至最低,对应的电网 功率爬坡率 d $P_{Grid}$ /dt 也达到最大,而飞轮功率变化率 d $P_{Fly}$ /dt 与之大小相等、符号相反。受飞轮转动惯量 的影响,飞轮机械角速度于 $t_2$ 时刻降到最低,这时飞 轮功率曲线过零点,FESS 由放电模式转换为充电模 式,负载充电功率完全由电网提供,母线电压也逐渐 回升。FESS存储的动能 $E_{Fly}$ 应满足 $\Delta E_{Fly}$ 的需求。

现行国家标准将单台直流充电机的功率上限值 设定为237.5 kW<sup>[17]</sup>。快速充电负荷的电压最大跌幅 计算值 $\Delta v_{demax}^{cale}$ 可按照其额定功率 $P_{Load}^{rate}$ (单位为kW)与 功率上限值的比值进行整定,同时还应满足电压最 大跌落幅度不超过5%的要求,则 $\Delta v_{demax}^{cale}$ 可表示为:

$$\Delta v_{\rm dc-max}^{\rm calc} = \frac{P_{\rm Load}^{\rm rate}}{237.5} v_{\rm dc-ref} \times 5\%$$
(4)

式(4)表明,当母线电压参考值确定后, $\Delta v_{de-max}^{calc}$ 与负载的额定功率大小直接相关。

假设电网功率爬坡率在快速充电初始阶段内近 似恒定,由式(1)可知 dP<sub>Grid</sub>/dt 可表示为:

$$\frac{\mathrm{d}P_{\mathrm{Grid}}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}\left[\frac{3}{2}E_{\mathrm{Gd}}\left(K_{\mathrm{gp}}\Delta v_{\mathrm{dc}(t)} + K_{\mathrm{gi}}\int_{t_{0}}^{t}\Delta v_{\mathrm{dc}(t)}\mathrm{d}t\right)\right]}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{3E_{\mathrm{Gd}}\left(K_{\mathrm{gp}}\Delta v_{\mathrm{dc}(t)}\mathrm{d}t + K_{\mathrm{gi}}\Delta v_{\mathrm{dc}(t)}\mathrm{d}t\right)} = \frac{1}{4}$$

当母线电压跌落幅值达到最大时, $d\Delta v_{dc(t)}/dt=0$ , 所以电网功率爬坡率达到最大。将此时 $dP_{Grid}/dt$ 的 值记为 $k_g$ (单位为kW/s),则 $k_g$ 可表示为:

$$k_{\rm g} = 3E_{\rm Gd} K_{\rm gi} \Delta v_{\rm dc-max}/2 \tag{6}$$

式(6)表明,电网功率的最大爬坡率与直流电压 的最大跌落幅值成正比。快速充电负荷的功率冲击 特性是由母线电压跌落直接造成的,通过减小母线 电压跌落幅值可有效缓解功率冲击。

结合式(4)与式(6),电网功率爬坡率亦可表示

为负载额定功率的函数,即:

$$k_{\rm g} = \frac{3}{2} E_{Gd} K_{\rm gi} \frac{v_{\rm dc-ref} \times 5\%}{237.5} P_{\rm Load}^{\rm rate}$$
(7)

式(7)表明,DC-FCS产生负荷冲击特性的根本 原因是突然加大功率负载。同时,快速充电初始阶 段的电网功率爬坡率与负载额定功率大小成正比。 图2描述了式(4)、式(6)与式(7)所反映的 $k_{g}$ 、 $\Delta v_{de-max}$ 、  $P_{load}^{rate}$ 之间的关系。



图 2  $k_{g}$ 、 $\Delta v_{de-max}$ 、 $P_{Load}^{rate}$ 之间的关系 Fig.2 Relationship among  $k_{g}$ ,  $\Delta v_{de-max}$  and  $P_{Load}^{rate}$ 

## 2 PMSM-FESS的约束条件

2.1 基于母线电压跌落幅值的 FESS 转动惯量约束 条件

FESS存储的动能
$$E_{Fly}$$
与机械功率 $P_m$ 可表示为:  

$$\begin{cases}
E_{Fly} = J\omega_m^2/2 \\
P_m = dE_{Fly}/dt = J\omega_m d\omega_m/dt
\end{cases}$$
(8)

其中,*J*为飞轮转子的转动惯量。由式(8)可以知道, FESS在 $t_1$ 时刻的机械角速度变化量 $\Delta \omega_{m(t_1)}$ 以及在 $t_0 - t_1$ 时段内释放的动能 $\Delta E_{Ev1}$ 可表示为:

$$\begin{cases} \Delta \omega_{\mathrm{m}(t_{1})} = \omega_{\mathrm{m-ref}} - \omega_{\mathrm{m}(t_{1})} \\ \Delta E_{\mathrm{Fly1}} = J \left( \omega_{\mathrm{m-ref}}^{2} - \omega_{\mathrm{m}(t_{1})}^{2} \right) / 2 \end{cases}$$
(9)

其中, $\omega_{m-ref}$ 为飞轮机械角速度的参考值。由于母线 电压的跌落会使等效负载的实际功率略低于额定功 率,为了提高相关参数的整定精度,取负载额定功率 值 $P_{\text{Load}}^{\text{rate}} = t_1$ 时刻实际功率的算数平均值作为负载的 等效额定功率 $\tilde{P}_{\text{Load}}^{\text{rate}}$ ,即:

$$\tilde{P}_{\text{Lord}}^{\text{rate}} = \left[ P_{\text{Lord}}^{\text{rate}} + \left( v_{\text{do ref}} - \Delta v_{\text{do max}} \right)^2 / R_{\text{L}} \right] / 2 \qquad (10)$$

当电网功率曲线与飞轮功率曲线相交时,电网 功率为负荷充电功率的1/2,则t<sub>1</sub>时刻及ΔE<sub>Fly1</sub>可表 示为:

$$\begin{cases} t_{1} = \tilde{P}_{\text{Load}}^{\text{rate}} / (2k_{\text{g}}) + t_{0} \\ \Delta E_{\text{Fly1}} = \tilde{P}_{\text{Load}}^{\text{rate}} (t_{1} - t_{0}) - \int_{t_{0}}^{t_{1}} k_{\text{g}} (t - t_{0}) dt \end{cases}$$
(11)

结合式(9),可得到基于飞轮机械能增量  $\Delta E_{Fy1}$  求解的转动惯量值  $J_{\Delta E}$  为:

$$J_{\Delta E} = \frac{2\Delta E_{\rm Fly1}}{\omega_{\rm m-ref}^2 - (\omega_{\rm m-ref} - \Delta \omega_{\rm m(t_1)})^2}$$
(12)

式(12)求解的 $J_{\Delta E}$ 在 $\omega_{m-ref}$ 与 $\Delta \omega_{m(t_1)}$ 已知的情况

下可满足t<sub>0</sub>—t<sub>1</sub>时段的负载充电能量需求。

此外,飞轮转动惯量还可通过飞轮功率变化率  $dP_{Fly}/dt 与 k_g之间互为相反数的关系进行求解,考虑$  $到式(1)中的飞轮功率控制方程,可知<math>t_1$ 时刻飞轮功 率变化率 $dP_{Fly}/dt$ 应满足如下关系:

$$\frac{\mathrm{d}P_{\mathrm{Fly}}/\mathrm{d}t = v_{\mathrm{dc-ref}} \left(\Delta v_{\mathrm{dc-max}} K_{\mathrm{fi}} - K_{\mathrm{\omega p}} \mathrm{d}\Delta \omega_{\mathrm{m}(t)} / \mathrm{d}t - \Delta \omega_{\mathrm{m}(t_{1})} K_{\mathrm{\omega i}} \right) = -k_{\mathrm{g}}$$
(13)

忽略飞轮电机的损耗,则t<sub>1</sub>时刻飞轮输出功率 与转子的机械功率*P*<sub>n</sub>相等,结合式(8)有:

$$P_{\rm m} = P_{\rm Fly} = J(\omega_{\rm m-ref} - \Delta\omega_{\rm m(t_1)})(-d\Delta\omega_{\rm m(t_1)}/dt) \quad (14)$$

由式(13)与式(14)可得到基于飞轮功率变化率 求解的飞轮转子转动惯量 $J_{dP/dt}$ 可表示为:  $J_{dP/dt} =$ 

$$\frac{P_{\rm Fly} v_{\rm dc-ref} K_{\rm \omega p}}{(\omega_{\rm m-ref} - \Delta \omega_{\rm m(t_1)}) (v_{\rm dc-ref} \Delta \omega_{\rm m(t_1)} K_{\rm \omega i} - v_{\rm dc-ref} \Delta v_{\rm dc(t_1)} K_{\rm fi} - k_{\rm g})}$$
(15)

飞轮转动惯量的最小取值 J<sub>min</sub>满足式(12)与式 (15) 所示任意约束条件即可,则 J<sub>min</sub>可表示为:

$$J_{\min} = \min \left\{ J_{\Delta E}, J_{dP/dt} \right\}$$
(16)

考虑到飞轮转动惯量的选取应留有一定的裕量,引入裕量系数*K*<sub>J</sub>,则转动惯量参考取值*J*<sub>ref</sub>可表示为:

$$J_{\rm ref} = K_J J_{\rm min} \tag{17}$$

转动惯量参考值 J<sub>ref</sub>的设定是实现对 FESS 容量 配置的基本条件,它与初始机械角速度共同决定了 飞轮储存动能的大小。

#### 2.2 FESS电磁约束条件

忽略定子电阻压降,永磁同步电机在 dq0 坐标 系下的稳态电压方程以及定子电压约束条件为:

$$\begin{cases} u_{sd} = -\omega_{m} p L_{sq} i_{sq} \\ u_{sq} = \omega_{m} p L_{sd} i_{sd} + \omega_{m} p \Psi_{r} \\ \sqrt{u_{sd}^{2} + u_{sq}^{2}} \leq v_{dc-ref} / \sqrt{3} \end{cases}$$
(18)

其中,p为电机的极对数; $u_{sd}$ 和 $u_{sq}$ 、 $i_{sd}$ 和 $i_{sq}$ 、 $L_{sd}$ 和 $L_{sq}$ 分 别为电机定子绕组电压、定子绕组电流、定子绕组电 感的d轴和q轴分量; $\Psi_r$ 为电机转子磁链。采用 $i_{sd}$ =0 的矢量控制策略,由式(18)所示约束条件可得飞轮 机械角速度满足如下条件:

$$\omega_{\rm m} \leq \frac{1}{p} \sqrt{\frac{v_{\rm dc-ref}^2}{3(\Psi_{\rm r}^2 + L_{\rm sq}^2 i_{\rm sq}^2)}} \tag{19}$$

由式(19)可知,基于母线电压幅值约束条件的 飞轮空载时的机械角速度上限ω"可表示为:

$$\omega_{\rm m}^{v} = v_{\rm dc-ref} / (\sqrt{3} \ p \Psi_{\rm r}) \tag{20}$$

当飞轮储能处于放电模式时,由式(19)可知 $i_{sq}$ 与 $\omega_{mref}$ 满足如下条件:

$$i_{sq}^{2} \leqslant \frac{v_{dc-ref}^{2}/3 - (p\omega_{m-ref}\Psi_{r})^{2}}{(p\omega_{m-ref}L_{sq})^{2}}$$
(21)

FESS通过在电动汽车快速充电初始时刻向负载提供所需功率,实现对电网功率的有效缓冲。忽略储能装置的损耗,飞轮电机的电磁功率 $P_e$ 与 $P_{Fly}$ 相等,则 $P_e$ 与 $P_{Flad}$ 满足式(22)所示关系。

$$\begin{cases} P_{\rm Fly} = P_{\rm e} \ge P_{\rm Load}^{\rm rate} \\ P_{\rm e} = 3p \Psi_{\rm r} \omega_{\rm m-rel} i_{sq}/2 \\ P_{\rm Load}^{\rm rate} = v_{\rm dc-ref}^2 / R_{\rm L} \end{cases}$$
(22)

由式(22)可知, $i_{sr}$ 与 $\omega_{m-ref}$ 还存在以下关系:

$$i_{sq} \ge \frac{2v_{dc-ref}^2}{3R_L} \frac{1}{p\omega_{m-ref}\Psi_r}$$
(23)

结合式(21)与式(23),在满足负载充电功率的 情况下,飞轮初始机械角速度上限ω<sup>p</sup>,可表示为:

$$\omega_{\rm m}^{P} = \frac{1}{p} \sqrt{\frac{v_{\rm dc-ref}^{2}}{3\Psi_{\rm r}^{2}}} - \frac{4}{9} \frac{v_{\rm dc-ref}^{4}}{R_{\rm L}^{2}} \frac{L_{\rm sq}^{2}}{\Psi_{\rm r}^{4}}$$
(24)

受 PMSM 定子绕组电流最大允许幅值 $i_N$ 的限制,满足式(22)所示功率关系的角速度取值下限 $\omega_n$ 为:

$$\omega_{\rm m}^{i} = 2v_{\rm dc-ref}^{2} / (3pR_{\rm L}\Psi_{\rm r}i_{\rm N})$$
<sup>(25)</sup>

此外,飞轮机械角速度增量在 $t_2$ 时刻达到最大, 所以 $\omega_{m-ref}$ 应不小于 $\Delta\omega_{m-max}$ 。当飞轮功率过零点时, 负载功率完全由电网提供, $k_g$ 的值在充电初始时段 内近似恒定,则 $t_2$ 时刻以及FESS在 $t_0-t_2$ 时段向负 载提供的电能 $\Delta E_{Fv2}$ 表示为:

$$\begin{cases} t_2 = \tilde{P}_{\text{Load}}^{\text{rate}} / k_{\text{g}} + t_0 \\ \Delta E_{\text{Fly2}} = \tilde{P}_{\text{Load}}^{\text{rate}} (t_2 - t_0) - \int_{t_0}^{t_2} k_{\text{g}} (t_2 - t_0) dt \end{cases}$$
(26)

根据式(8)可知, $t_2$ 时刻对应的飞轮机械角速度 增量最大值 $\Delta \omega_{m-max}$ 可由 $\omega_{m-mf}$ 与 $\Delta E_{Fly2}$ 表示为:

$$\Delta \omega_{\rm m-max} = \omega_{\rm m-ref} - \sqrt{\omega_{\rm m-ref}^2 - 2\Delta E_{\rm Fly2}/J_{\rm ref}} \qquad (27)$$

FESS的初始机械角速度应同时满足式(20)、式(24)、式(25)与式(27)所示约束条件,则初始机械角速度参考值 $\omega_{m-ref}$ 的最大取值 $\omega_{m-ref}^{max}$ 与最小取值 $\omega_{m-ref}^{min}$ 可表示为:

$$\begin{cases} \omega_{\text{m-ref}}^{\text{max}} = \min\left\{\frac{v_{\text{dc-ref}}}{\sqrt{3} p \Psi_{\text{r}}}, \frac{1}{p} \sqrt{\frac{v_{\text{dc-ref}}^2}{3 \Psi_{\text{r}}^2}} - \frac{4}{9} \frac{v_{\text{dc-ref}}^4}{R_{\text{L}}^2} \frac{L_{\text{sq}}^2}{\Psi_{\text{r}}^4}\right\} (28)\\ \omega_{\text{m-ref}}^{\text{min}} = \max\left\{2v_{\text{dc-ref}}^2/(3pR_{\text{L}}\Psi_{\text{r}}i_{\text{N}}), \Delta\omega_{\text{m-reg}}\right\}\end{cases}$$

本文所提计及源-储-荷功率特性的 PMSM-FESS容量配置方法在充电负荷额定功率确定后,分 别对转动惯量参考值与初始机械角速度进行整定。 由上述分析可归纳得到 $J_{ref}$ 与 $\omega_{m-ref}$ 的整定步骤如图 3 所示。

## 2.3 FSC容量约束条件

在满足充电初始阶段负载能量需求的基础上,



## 图 3 $J_{ref}$ 与 $\omega_{m-ref}$ 的整定步骤 Fig.3 Setting step of $J_{ref}$ and $\omega_{m-ref}$

对 PMSM-FESS 功率配置问题展开进一步探讨。FSC 的容量直接制约了 PMSM-FESS 向负载提供的功率, 所以有必要对 FSC 的容量进行分析。

本文认为在某一时间断面内,最多仅有1辆电动汽车启动快速充电。受LCC-SFC策略的影响,当 PMSM-FESS可以准确、快速地跟踪负载功率变化时,FESS的放电功率满足快速充电启动时刻负荷额 定功率需求即可。

将 FSC 实际通过的最大功率值记为 P<sub>Fly</sub>,考虑 到单辆电动汽车进行快速充电的功率上限为 237.5 kW,所以有:

$$P_{\rm Fly}^{\rm max} \ge 237.5 \text{ kW} \tag{29}$$

为了确保FSC在大功率负荷下仍可安全稳定运行,FSC的容量选择应留有一定的裕量,引入FSC容量裕量系数 $K_{\rm F}$ ,则PMSM-FESS的额定功率 $P_{\rm Fly}^{\rm rate}$ 可表示为:

$$P_{\rm Flv}^{\rm rate} = 237.5 K_{\rm F} \tag{30}$$

按照式(30)选取的FSC可满足快速充电启动瞬间负载充电功率的需要,避免了FSC容量配置的盲目性。

## 3 仿真分析

为了验证本文所提计及源-储-荷功率特性的 应用于 DC-FCS 的 FESS 容量配置方法的正确性,在 MATLAB / Simulink 平台中搭建附录中图 A1 所示的 配有 PMSM-FESS 的电动汽车 DC-FCS 仿真模型。系 统及相应的控制参数如附录中表 A1 所示。其中 3 组 PI 控制参数均由对 LCC-SFC 策略研究时采用试 凑法得到。该参数的选取与永磁同步电机参数相匹 配,可确保飞轮系统对负载功率的良好跟随特性。 后续仿真的实现以表 A1 中的参数为基础,但本文所 提 PMSM-FESS 容量优化配置方法并不依赖此参数 的具体取值而存在。

当直流母线电压额定值设置为700 V时,满足 式(28)的飞轮初始机械角速度的最大值约为789 rad/s,而最小值则约为97 rad/s。为了确保空载 情况下母线电压稳定,考虑初始机械角速度设置留 有一定的裕量,将飞轮初始机械角速度(转速)设定 为523.6 rad/s(5000 r/min)。当 $K_{\rm F}$ 取值为2.5 时, 根据式(30)可知FSC的额定容量选取为600 kW即 可满足快速充电负载的功率要求。

图 4 为将飞轮初始机械角速度(转速)设定为 523.6 rad / s(5 000 r / min),电动汽车负载等效电阻  $R_{\rm L}$ 在 3.5~10 Ω范围内以步长 0.5 Ω变化时,对应的负 荷额定功率与转动惯量参考值之间的关系。在 $\omega_{\rm m-ref}$ 确定后,随着 $P_{\rm Load}$ 的增大,转动惯量参考值的设置也 呈现增大的趋势,二者成正相关。



图 4  $P_{\text{Load}}^{\text{rate}} 与 J_{\text{ref}}$ 之间的关系 Fig.4 Relationship between  $P_{\text{Load}}^{\text{rate}}$  and  $J_{\text{ref}}$ 

为了与快充站内电动汽车直流充电机的实际功 率相吻合,将 $R_L$ 的值分别选取为10、7、5、3.5  $\Omega$ 进行 仿真分析,以验证针对不同额定功率负载对应的 $J_{ref}$ 与 $\omega_{m-ref}$ 设定的合理性。图5为上述4种等效负载电 阻接入时,配有 PMSM-FESS 的 DC-FSC 母线电压、飞 轮机械角速度以及系统功率的变化曲线。母线电压 最大跌落幅值和电网功率爬坡率的理论值( $\Delta v_{demax}^{sine}$ )以及转动惯 量参考值 $J_{ref}$ 与飞轮存储的动能 $E_{Fly}$ 如表1所示。仿 真过程中 $t_0$ 时刻统一选取为1s,对应的 $t_1$ 时刻分别 为2.65、2.65、2.66、2.66 s,对应的 $t_2$ 时刻分别为5.02、 4.91、4.84、4.63 s。而且 $t_1$ 时刻对应的 $\Delta \omega_{m(t_1)}$ 分别为 447、415、374、312 rad / s, $t_2$ 时刻对应的 $\Delta \omega_{m(t_2)}$ 分别 为416、368、304、203 rad / s。

由图 5 与表 1 可知,在 PMSM-FESS 采用 LCC-SFC 策略下,本文所提储能容量配置方法,通过对飞轮转动惯量参考值  $J_{ref}$  与飞轮转子初始机械角速度  $\omega_{m-ref}$  的整定,使得  $\Delta v_{de-max}$  与  $k_s$  的仿真值和理论预期 值基本相符。

仿真结果表明,本文所提计及源-储-荷功率特性的 PMSM-FESS 容量配置方法在满足充电初始时



Fig.5 Change curves of related parameters with different power loads

#### 表1 部分系统仿真数据

Table 1 Partial system simulation data

$P_{ m Load}^{ m rate}$ / $ m kW$	$\frac{\Delta v_{\rm dc-max}^{\rm calc}/}{\rm V}$	$\frac{\Delta v_{\rm dc-max}^{\rm simu}}{\rm V}$	$k_{ m g}^{ m calc}$ / (kW $\cdot$ s <sup>-1</sup> )	$\frac{k_{\rm g}^{\rm simu}/}{(\rm kW\cdot s^{-1})}$	$J_{ m ref}/$ (kg•m <sup>2</sup> )	$\frac{E_{\rm Fly}}{(W \cdot h)}$
49	7	7	16.33	15	1.57	59.78
70	10	10	23.32	21.6	1.64	62.45
98	14	13.5	32.66	30.4	1.76	67.02
140	20.6	20	48.05	45	1.92	73.11

刻负载充电功率与能量需求的前提下,可有效地限制电网功率爬坡率,并且补偿母线电压跌落。该方法在一定程度上实现了 PMSM-FESS 容量的优化 配置。

#### 4 结论

针对用以平抑 DC-FSC 电网功率爬坡率并补偿

母线电压跌落的FESS容量配置问题,提出计及源-储-荷功率特性的PMSM-FESS容量配置方法。分别 对4种功率不同的快速充电负载进行仿真分析,通 过对飞轮转动惯量参考值与初始机械角速度值的整 定,使得PMSM-FESS有效地缓解了快速充电引发的 电网功率冲击以及母线电压跌落的问题,验证了所 提容量优化配置方法的正确性,该方法有助于FESS 在电动汽车快速充电领域的实际应用。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

### 参考文献:

- [1]郭建龙,文福拴.电动汽车充电对电力系统的影响及其对策
   [J].电力自动化设备,2015,35(6):1-9,30.
   GUO Jianlong,WEN Fushuan. Impact of electric vehicle charging on power system and relevant countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(6):1-9,30.
- [2] 王育飞,蔡传高,薛花. 基于改进NSGA-Ⅱ的社区电动汽车充 电站优化充电策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(12): 109-115.

WANG Yufei, CAI Chuangao, XUE Hua. Optimized charging strategy of community electric vehicle charging station based on improved NSGA- II [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12):109-115.

[3] 杜习超,刘永民,徐则诚,等.电动汽车随机负荷建模及对配电
 网节点电压分布的影响[J].电力自动化设备,2018,38(6):
 124-130.

DU Xichao, LIU Yongmin, XU Zecheng, et al. Modeling of random load of electric vehicle and its influence on node voltage distribution of distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 124-130.

[4]秦岭,孔笑笑,茅靖峰,等.大型停车场电动汽车直流充电桩用 低电应力ZCS-PWM Superbuck变换器[J].电工技术学报, 2015,30(23):32-41.

QIN Ling, KONG Xiaoxiao, MAO Jingfeng, et al. ZCS-PWM Superbuck converter with reduced electric stress for electric vehicle DC charging spot in large parking lot [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23):32-41.

- [5] 胡畔,吴斌,陈红坤,等. 计及时序特性的电动汽车快充充电站 谐波分析[J]. 高电压技术,2019,45(11):3645-3655.
   HU Pan, WU Bin, CHEN Hongkun, et al. Harmonic analysis of electrical vehicle fast-charging station considering sequence behavior of load[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11):3645-3655.
- [6] TAN L C, WU B, RIVERA S, et al. Comprehensive DC power balance management in high-power three-level DC-DC converter for electric vehicle fast charging [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1):89-100.
- [7] RIVERA S, WU B. Electric vehicle charging station with an energy storage stage for split-DC bus voltage balancing [J].
   IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(3):2376-2386.
- [8] DENG J X,SHI J,LIU Y,et al. Application of a hybrid energy storage system in the fast charging station of electric vehicles
   [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(4): 1092-1097.
- [9] LIU Y,TANG Y J,SHI J,et al. Application of small-sized SMES in an EV charging station with DC bus and PV system[J].

IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25(3): 1-6.

- [10] SBORDONE D, BERTINI I, DI PIETRA B, et al. EV fast charging stations and energy storage technologies: a real implementation in the smart micro grid paradigm [J]. Electric Power Systems Research, 2015, 120:96-108.
- [11] 程启明,徐聪,程尹曼,等. 基于混合储能技术的光储式充电站 直流微网系统协调控制[J]. 高电压技术,2016,42(7):2073-2083.

CHENG Qiming, XU Cong, CHENG Yinman, et al. Coordination control of PV charging station DC microgrid system based on hybrid energy storage technology [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2073-2083.

- [12] DRAGICEVIC T, SUCIC S, VASQUEZ J C, et al. Flywheelbased distributed bus signalling strategy for the public fast charging station[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5 (6):2825-2835.
- [13] SUN B, DRAGICEVIC T, FREIJEDO F D, et al. A control algorithm for electric vehicle fast charging stations equipped with flywheel energy storage systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(9):6674-6685.
- [14] NEGARESTANI S, FOTUHI-FIRUZABAD M,RASTEGAR M, et al. Optimal sizing of storage system in a fast charging station for plug-in hybrid electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2016, 2(4):443-453.
- [15] 李振坤,李一骄,张代红,等.储能设备对有源配电网供电可靠 性的影响分析及优化配置[J].电网技术,2018,42(11):3676-3683.

LI Zhenkun, LI Yijiao, ZHANG Daihong, et al. Influence analysis of energy storage device on reliability of distribution network and its optimal allocation [J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3676-3683.

- [16] 孙军,盛立健,桑林. 电动汽车直流充电机负荷特性及建模与应用[J]. 电测与仪表,2017,54(7):116-121.
   SUN Jun, SHENG Lijian, SANG Lin. Load characteristic and model analysis for DC charger of electric vehicle[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2017,54(7):116-121.
- [17] 中国电力企业联合会.电动汽车传导充电系统第1部分 通用 要求:GB/T 18487.1-2015[S].北京:中国标准出版社, 2016.

#### 作者简介:



王育飞(1974—),男,安徽肥东人,教 授,博士,主要研究方向为电能质量分析与 控制、电力储能应用技术和电动汽车有序充 电(**E-mail**:wangyufei@shiep.edu.cn);

王成龙(1991—),男,河北邯郸人,硕士 研究生,研究方向为电动汽车快速充电、飞 轮储能应用技术(E-mail:wangchenglongxhl@ 163.com);

王育飞 16

薛 花(1979—), 女, 江苏无锡人, 副教授, 博士, 主要 研究方向为电能质量分析与控制(E-mail: xuehua@shiep.edu. cn);

徐文法(1993—),男,安徽安庆人,硕士研究生,研究方向 为电动汽车有序充电优化控制策略(E-mail:15756000636@ 163.com)。

> (编辑 陆丹) (下转第132页 continued on page 132)

#### 准[J]. 建筑电气,2011(4):3-9.

LIN Haixue. Lectures on national standard of power quality lecture one standard of supply voltage deviation [J]. Building Electricity, 2011(4):3-9.

#### 作者简介:

王守相(1973—),男,山东高密人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为分布式发电、微电网与智能配电系统



(E-mail:sxwang@tju.edu.cn);

张善涛(1992—),男,河南商城人,硕 士研究生,研究方向为分布式发电和储能 (E-mail:zhangshant@tju.edu.cn);

王 凯(1992—), 男, 山东广饶人, 博 士研究生, 研究方向为智能配电和储能 (**E-mail**: sduwangkai@126.com)。

(编辑 王欣竹)

## Multi-objective optimal operation of distributed energy storage considering user demand response under time-of-use price

WANG Shouxiang<sup>1</sup>, ZHANG Shantao<sup>1</sup>, WANG Kai<sup>1</sup>, HUANG Bibin<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. State Grid Energy Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: The minimum of distribution network loss and voltage deviation is taken as the optimization objective, and a multi-objective optimal model of distributed energy storage is established considering user demand response under time-of-use price. Distributed energy storage is explored to improve the operation level of distribution network by the dynamic combination of user demand response under time-of-use price. An improved genetic algorithm is presented to solve the optimal model. The test results prove that the multi-objective optimization of distributed energy storage considering user demand response under time-of-use price can effectively reduce the distribution network loss and the voltage deviation. It also shows that the improved genetic algorithm has the characteristics of faster evolution speed and better solution results.

Key words: distributed energy storage; distribution network; time-of-use price; demand response; genetic algorithms; optimization

(上接第124页 continued from page 124)

# Capacity configuration method of flywheel energy storage system considering power characteristics of generation-energy storage-load

WANG Yufei, WANG Chenglong, XUE Hua, XU Wenfa

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: In the application scenario of DC fast charging station of electric vehicles, a capacity configuration method of flywheel energy storage system considering power characteristics of generation-energy storage-load is proposed to limit the ramp rate of grid power and compensate the bus voltage drop. Firstly, according to the power relationship of generation-energy storage-load, the ratio of the increment of flywheel's mechanical angular velocity to the bus voltage sag amplitude is approximately a function of time. According to the power characteristics of grid-side converter in the fast charging station, it is deduced that the relationship between the maximum grid power ramp rate and the maximum sag amplitude of bus voltage is approximately proportional. Then, for the fast charging load with different rated power, the setting of the rotational inertia of flywheel rotor and the initial mechanical angular velocity is emphatically discussed, and the capacity constraints of the energy storage converter of the flywheel side are analyzed, on the basis of satisfying the DC bus voltage level and the electromagnetic constraint of permanent magnet synchronous motor. Finally, the system simulation model is built in MATLAB / Simulink to verify the correctness of the capacity configuration method of flywheel energy storage system.

**Key words**: electric vehicles; DC fast charging station; flywheel energy storage system; ramp rate of grid power; bus voltage; rotational inertia; mechanical angular velocity; capacity configuration; power characteristics

132

附 录



图 A1 配有 PMSM-FESS 的 DC-FCS 及控制系统结构图 Fig.A1 DC-FCS with PMSM-FESS and structure of its control system

表 A1 系统部分参数 Table A1 Part of system parameters

		,	
参数	数值	参数	数值
电网线电压 VGrid/V	380	电机极对数 p	4
滤波电感 Lline/mH	2.0	裕量系数 K <sub>J</sub> /K <sub>F</sub>	1.5/2.5
母线电压 V <sub>dc</sub> /V	700	GSC 比例系数 Kgp	0.5
直流侧电容 Cdc/mF	4.0	GSC 积分系数 Kgi	5
定子电阻 $R_s/m\Omega$	0.22	FSC 转速比例系数 Koop	0.6
定子等效 d 轴电感 L <sub>sd</sub> /mH	0.4	FSC 转速积分系数 K <sub>wi</sub>	0.1
定子等效 $q$ 轴电感 $L_{sq}/mH$	0.4	FSC 电压比例系数 K <sub>fp</sub>	5
转子磁链Ψ <sub>ff</sub> /Wb	0.128	FSC 电压积分系数 K <sub>fi</sub>	1