ANPC-5L逆变器电容电压平衡的优化算法

徐世周,常金海,范京生,贾鑫鑫

(河南师范大学 电子与电气工程学院,河南 新乡 453007)

摘要:针对有源中点钳位五电平(ANPC-5L)逆变器在g-h坐标系的空间矢量脉宽(SVPWM)算法下的悬浮 电容电压和直流电容中点电压发散问题,提出了一种建立边沿触发脉冲控制开关状态时间的方法,降低悬浮 电容电压波动,减小直流侧电容电压偏移。通过悬浮电容电流波动导致悬浮电容电压偏移的原理,依据不同 开关状态下输出相同的电平,且不同开关状态导致悬浮电容电流方向相反的原理,在一个完整周期内,使得悬 浮电容电流相互抵消,降低悬浮电容电压波动。建立一种主动功率流动模型,通过减小悬浮电容电压波动来 实现直流侧电容中点电压的平衡。最后,通过搭建仿真平台,对比应用所提方法前后 ANPC-5L 的电容电压平 衡情况,使方法的有效性得到验证。

关键词:有源中点钳位;五电平;g-h坐标系;中点平衡 中图分类号:TM464 文献标识码:A DOI:10.19457/j.1001-2095.dqcd25338

Optimization Algorithm for Capacitor Voltage Balance of ANPC-5L Inverter

XU Shizhou, CHANG Jinhai, FAN Jingsheng, JIA Xinxin

(School of Electronic and Electrical Engineering, Henan Normal University, Xinxiang 453007, Henan, China)

Abstract: A method for establishing edge triggered pulse control switch state time was proposed to address the divergence of floating capacitor voltage and DC capacitor midpoint voltage in a 5-level active neutral point clamped (ANPC-5L) inverter using the space vector pulse width (SVPWM) algorithm in the g-h coordinate system. The fluctuation of floating capacitor voltage and the offset of DC side capacitor voltage were reduced. The principle that the fluctuation of the floating capacitor current causes the voltage deviation of the floating capacitor was used. Based on the principle that the same level is output under different switch states, and different switch states cause the current direction of the floating capacitor to be opposite, within a complete cycle, the floating capacitor current cancels out each other, reducing the voltage of the DC side capacitor by reducing the voltage fluctuation of the floating capacitor. Finally, by building a simulation platform and comparing the capacitor voltage balance of ANPC-5L before and after the application of the proposed method, the validity of the method was verified.

Key words: active neutral point clamped (ANPC); five level; g-h coordinate system; neutral-point balance

与双电平变换器相比,多电平变换器具有电 压应力小、总谐波失真(THD)小、电磁干扰小等显 著优势^[1-3]。因此,多电平变换器被广泛应用于高 性能中压环境下。如可再生能源、船舶或飞机的 电力推进^[4-6]。具体而言,ANPC-5L变流器由于其 成本低、谐波低、电压平衡方法简单、输出电压电 平更灵活、可靠性更高等诸多吸引人的优点,得到 了广泛的研究^[7-8],更适合高性能中压电机驱动。

三相 ANPC-5L 变换器的简化电路如图 1 所

为了解决这一问题,近年来提出了几种调制 方法,如选择谐波消除 PWM(SHEPWM)和 SVP-WM。SHEPWM 方法是调节浮动电容(floating ca-

示,该变换器每一相由8个功率开关和1个飞电 容组成。虽然ANPC-5L变换器的研究已经进行 了很多年,但电容电压平衡算法仍然是研究的重 点。如果不能很好地控制电容电压,可能会导致 开关因应力过大而失效,降低系统效率和性能, 增加THD。

基金项目:河南省科技攻关项目(202102210299)

作者简介:徐世周(1985—),男,博士,副教授,Email:xushizhousiee@163.com

pacitor, FC)电压和中性点(neutral point, NP)电 压^[9]。通过交换机的开关模式来控制FC电压,同 时将NP电压控制到参考电压水平。然而,该算 法是离线计算,并依赖于表查找。



Fig.1 ANPC-5L three-phase topology

为了克服 SHEPWM 方法的缺陷,一种 SVP-WM策略来控制电容器电压的方法被提出,通过 选择冗余矢量序列控制 FC电压^[10]。此外,有学者 提出了另一种基于线电压坐标的 SVPWM 方 法^[11],通过判断输出电流和输出电压的方向来平 衡 FC电压。简化了基本向量的步长和基本向量 的运算时间。但由于开关矢量和开关序列中每 个基本矢量的停留时间的确定需要复杂的计算 和编程,因此在更高电压电平条件下使用 SVP-WM 方法将会复杂得多。此外,控制装置上的计 算压力会随着电压等级的升高而增大^[12]。

为了简化计算,基于g-h坐标系调制方法首 先提出于5L-NPC逆变器中^[13],采用了60°坐标系 的原理,将空间矢量坐标取整,避免扇区选择和 三角函数的运算,减少计算量。但是没有给出直 流电容中点电压和悬浮电容电压的平衡方法。

本文基于 g-h 坐标系对 ANPC-5L 逆变器进 行调制,针对中点电流引起的电容电压发散问 题,提出识别一个周期内上升沿和下降沿,控制 不同开关状态输出相同电平的时间相等的方法, 使一个周期内的电流相互抵消,以减小电容电压 发散。对该调制方法进行仿真,将前后 ANPC-5L 的电容电压平衡情况进行对比,以验证该调制方 法起到的电压平衡作用。

1 基于g-h坐标系SVPWM算法

1.1 算法简介

在g-h坐标系下不需要扇区判断和大量的三

角函数计算,计算简单,易于实现。该方法利用 三电平的基本矢量均为60°的特征,g轴与直角坐 标系中的α轴统一,将g轴逆时针旋转60°得到 h 轴。g-h坐标变换后,各电压矢量的坐标再归一 化为整数,大大降低了基本电压矢量选择和持续 时间计算的复杂性。坐标变换前、后的基本空间 电压矢量如图2所示。



Fig.2 The g-h coordinate system space vector coordinates

1.2 拓扑结构分析

如图 3 所示, ANPC-5L 单相拓扑上、下母线侧 各有一个直流链路电容 $C_1 \cap C_2$, 有一个悬浮电容 C_d 以及 8 个开关管, 分别为 S_{x1} , S_{x2} , S_{x3} , S_{x4} , S_{x5} , S_{x6} , S_{x7} , S_{x8} , $x=\{a, b, c\}_{\circ}$



Fig.3 ANPC-5L single-phase topology

设直流侧上母线电压为 u_{e1} ,下母线电压为 u_{e2} ,悬浮电容 C_d 的电压为 u_{ed} ,输出电流为 i_x ,中点电流为 i_o ,悬浮电容电流为 i_{ed} 。规定电流正方向为图3箭头方向。以母线侧中点为参考地,可输出5电平 v_x ={+2,+1,0,-1,-2},对应8种开关状态 S_x ={ V_0 , V_1 , V_2 , V_3 , V_4 , V_5 , V_6 , V_7 },开关状态所对应的实际输出电压为 u_x ,其不同开关状态对悬浮电容

的电压和中点电流影响如表1所示。

表1 开关状态与电压电流参数

Tab.1	Switch stat	us and voltage and	current para	meters
S_x	v_x	u_x	$i_{ m cd}$	i_o
V_7	+2	u_{c1}	0	0
V_6	+1	$u_{\rm c1} - u_{\rm cd}$	$-i_x$	0
V_5	+1	$u_{ m cd}$	i_x	i_x
V_4	0	0	0	i_x
V_3	0	0	0	i_x
V_2	-1	$-u_{\rm cd}$	$-i_x$	i_x
V_1	-1	$u_{\rm cd} - u_{\rm c2}$	i_x	0
V_0	-2	- <i>u</i> _{c2}	0	0

1.3 算法流程

设参考电压矢量 U_r 在变换前坐标系中坐标为 (U_{rg}, U_{g}) ,在g-h坐标系中为 (U_{rg}, U_{h}) ,坐标变换的公式为

$$\begin{bmatrix} U_{rg} \\ U_{rh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ 0 & \frac{2}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{\alpha} \\ U_{\beta} \end{bmatrix}$$
(1)

转换到g-h坐标系下参考电压矢量 $U_r(U_w, U_h)$,通过取整运算即可获得所在四边形的4个基本电压矢量:

$$\begin{cases} \boldsymbol{U}_{ul} = \begin{bmatrix} \operatorname{ceil}(\boldsymbol{U}_{rg}) \\ \operatorname{floor}(\boldsymbol{U}_{rh}) \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{U}_{lu} = \begin{bmatrix} \operatorname{floor}(\boldsymbol{U}_{rg}) \\ \operatorname{ceil}(\boldsymbol{U}_{rh}) \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{U}_{uu} = \begin{bmatrix} \operatorname{ceil}(\boldsymbol{U}_{rg}) \\ \operatorname{floor}(\boldsymbol{U}_{rh}) \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{U}_{ll} = \begin{bmatrix} \operatorname{floor}(\boldsymbol{U}_{rg}) \\ \operatorname{ceil}(\boldsymbol{U}_{rh}) \end{bmatrix} \end{cases}$$
(2)

式中: $ceil(\cdot)$ 和floor(·)分别为向上和向下取整; U_{u}, U_{u} 为最近的基本电压矢量。

合成参考矢量的第3个基本矢量在U_{uu}和U_u 中,且总是落在所形成的平行四边形对角线的同 一侧。对角线在g-h坐标系方程为

$$g + h = U_{ulg} + U_{ulh}$$
(3)
所以,第3个矢量判断如下:

1) 若 $U_{rg} + U_{rh} - (U_{ulg} + U_{ulh}) > 0, 则 U_{uu} 为第$ 3个矢量;

2)若 U_{rg} + U_{rh} - $(U_{ulg} + U_{ulh}) \le 0$,则 U_{u} 为第3 个矢量。 根据伏秒平衡原理,设 $U_1 = U_{ul}, U_2 = U_{lu},$ $U_3 = U_{ll}$ 或 U_{uu}, T_s 为一个周期,可以通过以下方程 求出3个矢量所分别作用的时间 T_1, T_2, T_3 :

$$U_{\rm ref} = T_1 \cdot U_1 + T_2 \cdot U_2 + T_3 \cdot U_3 \tag{4}$$

$$I_s = I_1 + I_2 + I_3$$
 (3)
当 $U_3 = U_u$ 时,得:

$$\begin{cases} T_{1} = (U_{rg} - U_{llg})T_{s} \\ T_{2} = (U_{rh} - U_{llh})T_{s} \\ T_{3} = T_{s} - T_{1} - T_{2} \end{cases}$$
(6)

当 $U_3 = U_{uu}$ 时,得:

$$\begin{cases} T_{1} = -(U_{rh} - U_{uuh})T_{s} \\ T_{2} = (U_{rg} - U_{uug})T_{s} \\ T_{3} = T_{s} - T_{1} - T_{2} \end{cases}$$
(7)

这样,我们可以得出3个矢量作用的时间,然 后对同一开关矢量V(g,h),通过下列的方程组确 定对应开关矢量的状态 $S(S_a, S_b, S_c)$:

$$\begin{cases} S_a = i \\ S_b = i - V_g \\ S_c = i - V_g - V_h \end{cases}$$

$$\tag{8}$$

且.

$$\begin{cases} -2 \le i \le 2 \\ -2 \le i - V_g \le 2 \\ -2 \le i - V_g - V_h \le 2 \end{cases}$$
(9)

不同的开关状态可能对应着相同的输出电 平,因此,可以通过合理选择开关状态来减小对 电容电压的影响^[14]。

2 电容电压平衡

理想情况下 FC 电压保持直流电压的 1/4 不 变,但它实际情况会受到中点电流和它本身充放 电情况的影响而产生电容电压的波动,进而会影 响直流侧电容电压波动和输出波形的质量。为 了保证 ANPC-5L 逆变器的输出波形的质量稳定 和直流侧中点电压的平衡,本文提出一种方法可 减小 FC 电容电压波动,实现电容电压控制平衡, 其流程图如图4所示。

结合表1的输出状态分析,开关状态V₁和V₂ 对应的输出电平为-1,V₅和V₆对应输出电平为 +1,对FC电压的影响相反。因此,控制FC电压 平衡需要检测输出的电平情况,当输出电平状态 为+1和-1时,通过逻辑信号的上升沿和下降沿使 开关状态V₅,V₆和V₁,V₂的作用时间相同,使得产 生的电流*i*_x和-*i*_x可以在一个周期内互相抵消,进 而完成FC电压的平衡控制。



Fig.4 Flow chart of suspended capacitor balance

从表1可知,ANPC-5L的直流侧电容电压和 FC电压是耦合的,悬浮电容电压平衡一定会影响 直流侧电容电压的平衡。图5是ANPC-5L的拓 扑的功率流动图。



图 5 ANPC-5L功率流向 Fig.5 ANPC-5L power flow direction

定义*P*_{dep}和*P*_{den}分别为直流侧上侧电容和下侧电容的输出功率,*P*_p和*P*_n分别为逆变器输出电压的正半轴和负半轴输出功率。则满足这样的功率关系:

$$P_{\rm dep} = P_1 + P_2 \tag{10}$$

$$P_{\rm den} = P_3 + P_4 \tag{11}$$

$$P_{\rm p} = P_1 + P_5 \tag{12}$$

$$P_{n} = P_{4} + P_{6} \tag{13}$$

当FC电压工频平衡,有:

$$P_2 + P_3 = P_5 + P_6 \tag{14}$$

当输出电流无直流分量时,有:

$$P_{\rm p} = P_{\rm n} \tag{15}$$

直流母线通过C_{dep}与C_{den}构成唯一的输入回路,则

$$I_{\rm dc} = I_{\rm dcn} = I_{\rm dcn} \tag{16}$$

对于电容,其输入功率和恒定输入电流满足 下式:

$$P_{\rm in} = I^2/C \tag{17}$$

电容容量和电压关系为
$$E = CU^2/2$$
 (18)

电容储存容量功率变化为

$$\Delta E = P_{\rm in} - P_{\rm out} \tag{19}$$

根据式(10),式(11),式(16)~式(19),直流 侧母线电容电压不变应满足:

$$I_{\rm dc}^2 / C_{\rm dep} = P_1 + P_2 \tag{20}$$

$$I_{\rm dc}^2 / C_{\rm dcn} = P_3 + P_4 \tag{21}$$

则

$$\frac{I_{\rm dc}^2}{C_{\rm dep}} - \frac{I_{\rm dc}^2}{C_{\rm den}} = P_1 + P_2 - (P_3 + P_4) = \Delta E_{\rm pn} \quad (22)$$

式中: ΔE_{μ} 为由直流母线侧的电容差异产生的输入功率差异。

设

$$-P_2 = \Delta E_c \tag{23}$$

式中:ΔE。为FC在正半轴输出功率与输入功率差值。 将式(23)代入式(14)得:

 P_{5}

$$P_6 - P_3 = \Delta E_{cp}$$
 (24)
将式(12)、式(13)代入式(15)得:

$$P_1 + P_5 = P_4 + P_6 \tag{25}$$

将式(23)~式(25)代入到式(22)得:

$$\Delta E_{\rm pn} = -2\Delta E_{\rm cp} \tag{26}$$

根据式(14)、式(22)和式(23)可知,在保证 中点电位不变、FC电压平衡和输出不含直流分量 的情况下,直流侧电容和FC的功率变化符合式 (26),即直流侧电容容值差异产生电容输入功率 差异,使得FC电压在工频半周期的输出功率不 等于输入功率,进而使得FC电压偏离额定值。 在另一个角度,设

$$\frac{I_{\rm dc}^2}{C_{\rm dep}} - (P_1 + P_2) = \Delta P_{\rm c}$$
(27)

由于直流侧的母线电压不变,则 C_{dep} 和 C_{den} 的总能量不变,因此有:

$$\frac{I_{\rm dc}^2}{C_{\rm den}} - (P_3 + P_4) = -\Delta P_{\rm c}$$
(28)

将式(23)~式(26)代入式(22)得:

$$\Delta P_{\rm c} = \frac{\Delta E_{\rm pn} + 2\Delta E_{\rm cp}}{2} \tag{29}$$

从上述公式得出,通过调节周期内悬浮电容 电压的输入输出功率,即FC电压的额定平衡值, 可以实现在无直流分量输出情况下对直流侧中 点的电压平衡。

3 仿真实现

为了验证上述理论分析和基于g-h坐标系空间矢量算法的正确性,我们在 Matlab/Simulink 环境下对中点和FC电压控制进行了仿真验证,模拟参数如下:直流侧电压 V₄=1 500 V,直流侧电容

C=4 700 μF,电阻*R*=10 Ω,电感*L*=0.8 mH,开关频 率*f*_s=2 kHz。

图6为FC电压施加控制前、后仿真结果对比图,图7为中点电容电压在控制前、后对比图,图 8为控制后的线电流波形及其THD,图9为输出的线电压波形图与THD。



从图6中可以看出在施加控制策略后,FC电 压的波动从320 V(标准300 V)降低到300 V,FC 电压得到控制。



Fig.7 Midpoint voltage balance



输出波形的影响。

图 8 和图 9 中给出了施加控制算法后的输出 线电压与线电流,并进行了THD分析,其THD值 都在5%以下。



4 结论

为了解决g-h坐标系下的ANPC-5L中点电 压和FC电压的平衡问题,本文提出了一种新型 的、不用直流侧电容和悬浮电容解耦的算法,实 现了ANPC-5L逆变器的中点电容电压与悬浮电 容电压的平衡控制。该控制算法采用了边沿触发 信号,使得悬浮电容一个周期内的正、负电流相 互抵消,实现对悬浮电容电压波动的控制;采用 功率流动模型,使存在的中点电压偏移也因FC 电压平衡后得到收敛。通过仿真验证,FC电压波 动在0.2 V以内,中点电容电压偏移情况得到解决。 输出的线电压和线电流波形THD在5%以下。

参考文献

- RODRIGUEZ J, BERNET S, STEIMER P K, et al. A survey on neutral-point-clamped inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(7):2219–2230.
- [2] CHEN Jinyu, DAI Liyu, LI Zhicheng, et al. Research on control strategy of transient disturbance based on the three-level hybrid energy storage converter[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2351(1):12–25.
- [3] 许水清,黄文展,何怡刚,等.基于自适应滑模观测器的中点 钳位型三电平并网逆变器开路故障诊断[J].电工技术学报, 2023,38(4):1010-1022.

XU Shuiqing, HUANG Wenzhan, HE Yigang, et al. Open-circuit fault diagnosis method of neutral point clamped three-level grid-connected inverter based on adaptive sliding mode observer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38 (4):1010-1022.

- [4] 吴振鑫,常国祥.ANPC光伏逆变器的并网研究[J].电力学报,2021,36(2):154-163,172.
 WU Zhenxin, CHANG Guoxiang. Research on grid connection of ANPC photovoltaic inverters[J]. Journal of Electric Power, 2021,36(2):154-163,172.
- [5] 常非,赵丽平.高压大容量五电平变换器在RPC中的应用
 [J].电力系统及其自动化学报,2014,26(9):40-45.
 CHANG Fei, ZHAO Liping. Application of high voltage and high capacity five level converters in RPC[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2014,26(9):40-45.
- [6] XIAO Huafeng. Overview of transformerless photovoltaic gridconnected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1):533-548.
- [7] 崔贵平.电气化铁路电能质量与制动能量回收控制系统研究[D].长沙:湖南大学,2020.

CUI Guiping. Research on electric energy quality and braking energy recovery control system for electrified railways[D]. Changsha:Hunan University, 2020.

- [8] KOURO S, MALINOWSKI M, GOPAKUMAR K, et al. Recent advances and industrial applications of multilevel converters[J].
 IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57 (8): 2553-2580.
- [9] 李永东,徐杰彦,杨涵棣,等.多电平变换器拓扑结构综述及 展望[J].电机与控制学报,2020,24(9):1-12.
 LI Yongdong, XU Jieyan, YANG Handi, et al. Overview and prospects of multilevel converter topology[J]. Electric Machines and Control,2020,24(9):1-12.
- [10] 刘佳新.五电平 ANPC 逆变器新型 SVPWM 共模电压抑制方 法研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2022.
 LIU Jiaxin. Research on a novel SVPWM common mode voltage suppression method for five level ANPC inverters [D]. Fuxin:Liaoning University of Engineering and Technology,2022.
- [11] 刘战.有源中点钳位型五电平变频器控制系统研究[D].徐州:中国矿业大学,2016.
 LIU Zhan. Research on the control system of active neutral clamping five level inverter[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2016.
- [12] LE Quoc Anh, LEE Dong-Choon. Elimination of common-mode voltages based on modified SVPWM in five-level ANPC inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 34(1): 173 - 183.
- [13] 于月森,赵成成,符晓,等.基于g-h坐标系SVPWM控制算 法5电平逆变器仿真研究[J].电气传动,2011,41(12):37-40,65.

YU Yuesen, ZHAO Chengcheng, FU Xiao, et al. Simulation study of 5-level inverter based on *g*-*h* coordinate system SVP-WM control algorithm[J]. Electric Drive, 2011, 41(12):37-40, 65.

- [14] 林宏健. 三相级联H桥多电平变换器SVPWM均压与重构算 法研究[D].成都:西南交通大学,2021.
 - LIN Hongjian. Research on the voltage equalization and reconstruction algorithm of three-phase cascaded H-bridge multilevel converter SVPWM[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.

收稿日期:2023-08-30 修改稿日期:2023-09-15

双边LCC 拓扑磁耦合机构补偿网络参数 设计方法

张博雨¹,张晓丽²,冯睿³,张照博³,蔡思淇²,马晓轩²

(1. 广州石油培训中心有限公司,广东广州 510000; 2. 许继电源有限公司,河南 许昌 461000;3. 中国石油天然气股份有限公司广东销售分公司,广东广州 510000)

摘要:基于磁耦合谐振式技术原理,采用一种双边LCC拓扑补偿网络参数设计方法。首先对双边LCC拓 扑主电路数学模型进行分析,设定线圈自感与串联补偿电感的电感比值。然后通过编写M文件和搭建Simulink 仿真平台,根据电感比值与效率之间的关系,找到最优效率点。最后搭建全SiC MOSFET器件系统实验平 台进行验证。实验结果表明,通过设置合适的电感比值,在满功率偏移范围内,耦合机构效率能够保持在95% 左右,系统最大效率大于92.5%,证明了该补偿网络参数设计方法是有效的。

关键词:磁耦合谐振;双边LCC拓扑;电感比值;SIC MOSFET器件;耦合机构效率 中图分类号:TM28 文献标识码:A DOI:10.19457/j.1001-2095.dqcd25847

Design Method of Compensation Network Parameters for Bilateral LCC Topological Magnetic Coupling Mechanism

ZHANG Boyu¹, ZHANG Xiaoli², FENG Rui³, ZHANG Zhaobo³, CAI Siqi², MA Xiaoxuan²

(1.Guangzhou Petroleum Training Center Co., Ltd., Guangzhou 510000, Guangdong, China;
 2.Xu Ji Power Co., Ltd., Xuchang 461000, Henan, China; 3.China National

Petroleum Company Limited Guangdong Sales Branch, Guangzhou 510000, Guangdong, China)

Abstract: Based on the principle of magnetic coupling resonance technology, a bilateral LCC topology compensation network parameter design method was adopted. Firstly, the mathematical model of the main circuit of the bilateral LCC topology was analyzed, and the inductance ratio of the coil self-inductance and the series compensation inductance was set. Then, by writing an M file and building a Simulink simulation platform, according to the relationship between inductance ratio and efficiency, found the optimal efficiency point. Finally, a all-SiC MOSFET device system experimental platform was built for verification. The experimental results show that the efficiency of the coupling mechanism can be maintained at about 95% and the maximum efficiency of the system is more than 92.5% in the range of full power offset by setting the appropriate inductance ratio, which proves that the compensation network parameter design method is effective.

Key words: magnetic coupling resonance; bilateral LCC topology; inductance ratio; SiC MOSFET device; coupling mechanism efficiency

无线电能传输技术主要是利用机械波、电场 或磁场等中间介质来传输电能,供电系统与充电 负载量传输技术是于2006年11月在美国物理学 会工业物理论坛上首次被提出的^[1]。其采用交变 磁场作为空间能量传递的媒介,能量传输方式具 有良好的穿透性、无严格的方向性,能同时给有 效区域内多个相近谐振频率的接收端供电,而其 他频率不匹配的物体几乎不受影响,因此具有传 输距离较远、效率高以及无需通过金属导线连接 等优点。其中磁耦合谐振式无线技术具有能效 高、功率密度大等诸多优点,已经成为了当今无 线输电领域的研究热点^[2]。

作者简介:张博雨(1987—),女,硕士研究生,助理研究员,主要研究方向为教育培训,Email:zbysweet@petrochina.com.cn 32

耦合机构的补偿电路主要用于实现发射端 和接收端线圈的频率补偿,保证谐振频率接近, 提升系统性能⁽³⁾。不同类型的补偿电容或补偿电 感电压电流应力存在很大差异,因此补偿电路的 拓扑选择是该环节的设计重点^[4-6]。双边LCC 拓 扑具有完美的对称性,兼顾串联与并联的各自优 点,同时复合补偿网络里面的谐振元件以及基本 的缓冲电路能够有效降低开关损耗,提高开关频 率,易于实现软开关,提高系统整体的传输效率, 已经成为国内外研究热点。

美国密歇根大学 Chris Mi 教授领导的研究小 组从电路补偿网络拓扑的角度出发,第一次提出 了双边LCC拓扑补偿网络,该网络是由两个补偿 电容以及一个补偿电感构成的T型结构,并对其 电路特性进行了分析,确保了谐振频率与耦合系 数和负载条件无关^[7]。接着,该研究团队又设计 了基于双耦合、LCC 拓扑补偿网络结构,除了原、 副边线圈耦合之外,原、副边补偿电感器也耦合 在一起以传输更多功率[8]。文献[9]综合考虑电路 传输功率和效率,得出LCC补偿型无线充电系统 电路要优于其它四种基本补偿拓扑。双边LCC 拓扑由于匹配自身电感补偿电容的加入,自感与 谐振补偿电感并无直接联系,增加补偿拓扑参数 配置灵活性。文献[10]研究了双边 LCC 拓扑补偿 网络及其整定方法,经过分析不同间距不同耦合 系数对系统效率的影响,得到谐振频率与耦合系 数和负载条件无关,但未充分考虑系统参数设计 的问题。文献[11]仅研究了原副边线圈自感、双 边LCC拓扑原副边补偿电感、电容相同的参数设 计方法,并未考虑原副边线圈自感、双边LCC拓 扑原副边补偿电感、电容不相同的双边LCC拓扑 补偿网络的参数设计问题。

文献[12] 基于双边LCC互感模型的阻抗特性 分析法,提出通过改变输入阻抗特性(即通过原 边或者副边串联补偿电容)来调整关断电流以达 到优化前级H桥变换器ZVS的参数的目的,从阻 抗和电压增益角度对比分析了这两种优化参数 方法对谐振电路特性的影响。通过改变谐振参 数进而改变系统输出特性,提供一种不同工况下 双LCC补偿拓扑参数设计思路,但侧重点并不在 补偿网络的参数设计。文献[13]提出一种基于双 边 LCC 谐振补偿网络的参数设计方法,通过推导 出的输出电流和等效阻抗表达式,将电容耐压与 系统等效阻抗设定在一定范围内,并通过仿真逐 步确定谐振拓扑补偿电容参数的范围。虽能实现无线充电系统谐振补偿网络参数的优化,但是设计方法复杂且参数范围较大,不利于准确确认 拓扑参数值。

为了解决由于原、副边线圈自感不同而带来 的补偿网络参数不对称相等的计算问题,本文提 出一种双边LCC拓扑磁耦合补偿网络参数设计 方法。通过设定线圈自感与串联补偿电感的电 感比值,根据谐振条件、原副边线圈电压电流、补 偿电感电压电流、传输功率、效率等之间的关系, 找到最优效率点,确定整个补偿网络的参数值。 通过搭建仿真和实验平台,验证参数设计方法的 可行性和有效性。

无线充电耦合机构双边LCC拓扑 网络主电路数学模型

双边LCC补偿拓扑虽然补偿元件较多,但补 偿元件应力相对较小,且其传输效率较高,具有 线圈恒流、输出恒流等特性,其对参数敏感程度 相对较低,具有较高的功率传输能力、较好的抗 偏移特性,因此,中小功率等级无线充电系统的 补偿网络拓扑选取双边LCC拓扑。

为简化计算,假设原副边线圈电阻、补偿电 感及补偿电容的电阻均为0。当系统开关频率在 谐振网络谐振频率附近时,可用基波等效模型近 似分析。双边LCC补偿网络主电路拓扑示意图 如图1所示,其基波等效电路图如图2所示。





bilateral LCC compensation network

图中,L_p,L_s为原、副边线圈自感;C_{ps},C_{ss}为原、 副边串联补偿电容;L_p,L_s为原、副边串联补偿电 感;C_p,C_s为原、副边并联补偿电容;S₁~S₈分别为 原边和副边构成H桥的SiC MOSFET;u₁,u₂为双 边LCC补偿网络输入和输出电压;U₁,U₂分别为 u₁,u₂的基波分量的有效值;U_{4p}为高频逆变电源输 入电压;U_{4s}为副边整流输出电压;M为原、副边线 圈互感;R_F为交流等效负载;R₁为直流等效负载。

为了提高效率,需要保证双LCC补偿拓扑的 原、副边功率因数均为1。系统处于谐振工作状态,使系统参数配置如下:

$$\begin{cases} \omega L_{\rm rp} = \omega L_{\rm p} - \frac{1}{\omega C_{\rm ps}} = \frac{1}{\omega C_{\rm p}} \\ \\ \omega L_{\rm rs} = \omega L_{\rm s} - \frac{1}{\omega C_{\rm ss}} = \frac{1}{\omega C_{\rm s}} \end{cases}$$
(1)

根据KVL定律,建立双边LCC补偿网络系统 电压方程如下:

$$\begin{cases} -\frac{1}{j\omega C_{p}} = u_{1} \\ -\frac{1}{\omega C_{p}} I_{rp} - j\omega M I_{s} = 0 \\ -\frac{1}{\omega C_{s}} I_{rs} - j\omega M I_{p} = 0 \\ \frac{1}{j\omega C_{s}} I_{s} = u_{2} \end{cases}$$
(2)

全桥逆变后的基波电压与全桥逆变的输入 电压有如下关系:

$$\begin{cases} U_{1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_{dp} \\ U_{2} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_{ds} \\ R_{E} = \frac{8}{\pi} R_{L} \end{cases}$$
(3)

其原边线圈和副边线圈电流分别为

$$\begin{cases} I_{\rm p} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{U_{\rm dp}}{\omega L_{\rm rp}} \\ I_{\rm s} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{U_{\rm ds}}{\omega L_{\rm rs}} \end{cases}$$
(4)

由式(4)可以看到,系统在谐振条件对应的 谐振频率点下工作时,双边LCC补偿拓扑的原、 副边线圈电流均只与输入、输出直流母线和补偿 电感相关,与负载及耦合系数无关,系统不会出 现空载过流的危险。

双边 LCC 补偿拓扑输入、输出均为恒流特性,输入电流和输出电流分别为

$$\begin{cases} I_{\rm in} = \frac{2\sqrt{2} U_{\rm ds}}{\pi} \frac{k \sqrt{L_{\rm p} L_{\rm s}}}{\omega L_{\rm rp} L_{\rm rs}} \\ I_{\rm o} = \frac{8 U_{\rm dp}}{\pi} \frac{k \sqrt{L_{\rm p} L_{\rm s}}}{\omega L_{\rm rp} L_{\rm rs}} \end{cases}$$
(5)

式中:k为耦合系数。

该恒流源输出特性适合于对电池直接充电, 其传输功率为

$$P_{o} = \frac{8}{\pi^2} \frac{k \sqrt{L_{p} L_{s}}}{\omega L_{rp} L_{rs}} U_{ds} U_{dp} \sin \frac{\beta_{p}}{2} \sin \frac{\beta_{s}}{2} \qquad (6)$$

式中: β_n , β_s 分别为原、副边H桥的移相角。

可以看到,采用双有源控制可以实现功率的 全范围调节。双边LCC拓扑补偿电感值小于原 副边线圈电感值,更小的电感值意味着更小的体 积和重量,因此,采用双边LCC拓扑补偿网络有 着更高的功率密度。

2 耦合机构双边LCC拓扑网络参数 设计及仿真分析

2.1 设计步骤

耦合机构双边 LCC 拓扑网络参数设计方法 总体思路及实施步骤如图 3 所示。



图3 设计方案实施步骤

Fig.3 Implementation steps of the design scheme

首先已知耦合机构原、副边线圈自感值,设 定无线充电系统耦合机构拓扑补偿网络谐振频 率。原边线圈自感与原边串联补偿电感的比值、 副边线圈自感与副边串联补偿电感的比值公式 如下式所示:

$$\begin{cases} \alpha_{\rm p} = \frac{L_{\rm p}}{L_{\rm rp}} \\ \alpha_{\rm s} = \frac{L_{\rm s}}{L_{\rm rs}} \end{cases}$$
(7)

然后对双边 LCC 拓扑补偿电路进行分析,从 设计指标如最小传输功率 Pomin、最大传输距离、极 限偏移量等参数入手,当耦合系数 k, L_p, L_s均取最 小值,可得原、副边电感比值系数的乘积为

$$\alpha_{\rm s}\alpha_{\rm p} = \frac{\omega\pi^2 P_{\rm omin}\sqrt{L_{\rm pmin}L_{\rm smin}}}{8\eta k_{\rm min}U_{\rm dsmin}U_{\rm dpmax}} \tag{8}$$

也就是说系统需在最小耦合系数 k_{min} 、最大输入电压 U_{dpmax} 、最小输出电压 U_{dsmin} 下实现满载功率输出,预估该工况下的无线充电系统效率,选择不同电感比 α_n 和 α_x 满足功率需求。

设定 α_p和 α_s取值的范围一般在 1~5 之间,取 值越大,谐振电感的体积越小。具体的 α_p和 α_s取 值关系到系统的效率,也和耦合机构线圈的品质 因数、开关管以及谐振电感的损耗、电压范围、互 感范围有关,为了在较宽的电压范围内均实现较 高的传输效率,需要遍历寻找最优解。

获得地端和车端电感比后,可根据电感比对 系统的补偿电感和补偿电容进行参数设计,设计 的原则主要有两个,一是线圈恒流,二是单位功 率因数。获得电感比后,为了保证系统软开关, 根据式(1)选取地端自感的最大值*L*_{pmax}进行原边 补偿电容和补偿电感的参数设计。使用 Matlab 仿真软件,考虑线圈、补偿电感的损耗与效率的 关系,得到原边电感比值系数与效率的关系,然 后根据该值选取效率最大值对应的比例系数,进 而得到相应的补偿电感值。

综合市场产品电气参数,此处设定无线充电 系统耦合机构拓扑补偿网络谐振频率f=85 kHz, $U_{dpmax}=760$ V, $U_{dpmin}=380$ V, $U_{dsmax}=450$ V, $U_{dsmin}=320$ V, 根据 ANSYS 仿真得到车地端线圈自感 $L_{pmax}=$ 77.646 μ H, $L_{smax}=45.507$ μ H, $L_{pmin}=77.142$ μ H, $L_{smin}=$ 38.161 μ H,工作气隙为190~210 mm时,耦合系 数 $k_{pmax}=0.307$ 1, $k_{pmin}=0.168$ 。编写 Matlab的M文 件求解耦合机构最大效率点对应的比值系数。 仿真结果如下: $\alpha_{p}\alpha_{s}=6.737$ 2,对应的 α_{p} 为 2.36, α_{s} 为 2.854 7。仿真结果如图4所示。

更进一步的效率曲线还包括整个系统的损 耗值,如车地端全桥通态损耗、电容损耗、辅电损 耗等,进而计算出整个系统的损耗值。根据整个 系统效率随电感比值系数的变化规律,选取最大效率点对应的比值系数,进而确定整个补偿网络的参数值,实现对系统耦合机构拓扑补偿网络的参数优化。优化结果 $\alpha_{p}\alpha_{s}=6.7372$,对应的 α_{p} 为2.33, α_{s} 为2.8915。仿真结果如图5所示。



Fig.5 Relationship between system efficiency and inductance ratio α_p

2.2 仿真分析

根据优化后的比值系数乘积 $\alpha_{p}\alpha_{s}$ =6.737 2, 对应的 α_{p} 为2.33, α_{s} 为2.891 5。由式(1)和式(7)计 算可得 L_{rp} =33.108 2 μ H, L_{rs} =13.197 6 μ H, C_{p} =104.658 nF, C_{rs} =78.69 nF, C_{s} =262.55 nF, C_{ss} =138.8 nF。

为了验证上述参数设计方法的可行性及正确性,把相关参数代入Simulink模块中建立6.6 kW无线充电系统仿真模型,如图6所示。输入电压有效值 U_1 为650 V,开关频率为85 kHz,交流的等效电阻 $R_{\rm E}$ =25 Ω_{\circ}

计及线圈损耗、补偿电感损耗、补偿电容损 耗等,则双边LCC拓扑网络耦合机构效率仿真结 果如图7所示为95.43%。

计及整个系统的损耗值,包括地端全桥的通态损耗、车端全桥的通态损耗、电容损耗、辅电损耗等,得到前级PFC整流和后级的DC-DC整流效率分别是98.8%和98.29%,实现了系统的高效率、高密度传输。



图6 双边LCC 拓扑网络的基波等效模型





3 实验结果

功率半导体器件一直被认为是电力电子设备的关键组成部分^[14]。SiC材料较Si材料有难以比拟的优越性,可制作出具有耐高压、耐高温、高频率、高功率密度、强辐射特性的器件。对比Si MOSFET,SiC MOSFET具有耐压高、易散热、导通损耗和开关损耗低等特性。为减小原、副边全桥开关损耗,获得较高的系统效率,本文选用SiC MOSFET作为开关管。

搭建6.6 kW无线充电系统实验平台,主要包36

括原边电源模块、双边LCC 拓扑磁耦合机构、副 边电源模块及电阻负载等,其中原边电源模块接 工业用电380 V交流电。无线充电系统模拟实验 平台实物如图8所示,双边LCC补偿网络结构实 物图如图9所示。



图 8 无线充电系统模拟实验平台实物图 Fig.8 Physical diagram of wireless charging system simulation experiment platform



图 9 双边 LCC 补偿网络结构实物图 Fig. 9 Physical diagram of bilateral LCC compensation network structure

3.1 实验数据和波形

为验证文中提出的双边LCC拓扑网络参数

设计方法具有较高的传输功率和传输效率,在输 出功率为满功率、耦合机构工作气隙为190~210 mm时,耦合机构正对放置和极限偏移放置时系 统功率、效率测试结果表1所示。

表1 耦合机构正对和极限偏移放置时系统功率、效率

Tab.1 System power and efficiency when coupling mechanism is placed in positive alignment and limit offset

相对位要	输入功	输出功	系统效	耦合机构
相对位且	率/kW	率/kW	率/%	效率/%
(0,0,190)	7.177	6.649	92.635	95.98
(-75,-100,190)	7.215	6.659	92.08	95.90
(0,0,200)	7.160	6.635	92.664	96.12
(-75,-100,200)	7.233	6.663	91.8	95.98
(0,0,210)	7.191	6.658	92.588	95.68
(-75,-100,210)	7.237	6.638	91.26	95.18

同功率不同位移系统效率实验结果三维图 如图10所示。



进一步观察其他性能,通过功率分析仪

WPT1800可得,在耦合机构相对位置(0,0,190) 额定工况下,额定工作点系统输入、输出功率和 效率如图11所示,系统输入侧谐波电流测试结果 如图12所示。通过示波器可得系统地端桥口电 压和车端桥口电压如图13所示,耦合机构地端补 偿电感电流及其谐振频率如图14所示。





change	e items		Ordor	12 [4]	bdf[¥]	Ordor	12 [4]	bdf [V
(DLL 4 all	D FO 000	11-	Truel	13 [h]	nui [/øj	oruer	13 [n]	0.700
TPLLIDU	3 50.000	HZ	Total	31.308		ac	0.228	0.728
			1	31.302	99.980	2	0.050	0.159
			3	0.504	1.609	4	0.050	0.160
Urms3	229.16	٧	5	0.098	0.314	6	0.054	0.173
lrms3	31.361	Α	7	0.166	0.530	8	0.053	0.169
P3	7.177	k₩	9	0.088	0.282	10	0.013	0.043
S3	7.187	kVA	11	0.049	0.155	12	0.009	0.029
Q3	0.368	kvar	13	0.038	0.121	14	0.009	0.029
λ3	0.9987		15	0.021	0.067	16	0.009	0.030
Φ3	2.93	۰	17	0.022	0.070	18	0.007	0.023
			19	0.027	0.086	20	0.004	0.014
Uthd3	1.137	%	21	0.018	0.057	22	0.004	0.013
lthd3	1.842	%	23	0.032	0.102	24	0.003	0.009
Pthd3	0.008	%	25	0.029	0.093	26	0.005	0.016
Uthf3	0.447	%	27	0.029	0.092	28	0.006	0.019
lthf3	0.737	%	29	0.035	0.112	30	0.006	0.018
Utif3	18.607		31	0.042	0.133	32	0.006	0.020
ltif3	31.193		33	0.044	0.140	34	0.008	0.024
hvf3	0.611	%	35	0.048	0.154	36	0.008	0.025
hcf3	0.984	%	37	0.057	0.181	38	0.004	0.014
Kfact3	1.0256		39	0.059	0.187	40	0.006	0.018
PACET	2/11						AP.	ACE 1/12

图12 输入侧谐波电流测试结果





bridge voltage of the system

3.2 实验结果分析

由表1和图10可知,系统最大效率能够达到





92.5%,耦合机构效率能够保持95%以上;在最大距离、最大偏移情况下,系统效率略小于92.5%, 但是耦合机构效率依然保持在95%以上。

由图 11 和图 12 可知, 双边 LCC 谐振网络中存在 1,3,5,7等奇次谐波, 如不加处理, 对相位检测精度会造成不利影响, 造成系统工作于硬开关模式, 大幅增大开关损耗, 降低系统效率, 影响系统散热。通过频率分离, 采用 85 kHz 作为基波频率, 经低通滤波后, 滤除高频成分, 进行锁相角度计算, 并留有 30°左右的相移相角度裕量, 保证系统在全工作范围实现软开关。

由图13和图14可知,车端桥口电压和地端桥口电压占空比基本开满,系统车地端SiC MOS-FET基本实现软开关。此时,SiC MOSFET管损耗较小,功率密度增大,发热量减小,同时,开关噪 声减小,相应的电磁干扰小,系统总损耗减小;耦 合机构谐振频率点均固定在85 kHz附近,不存在 因耦合机构相对偏移位置造成失谐的现象,原、 副边均实现单位功率因数,原边无功功率和副边 无功功率并没有通过耦合机构进行无功能量交 换,减小输入功率等级,提高系统效率。

实验结果与理论、仿真分析的结果一致,耦 合机构双边LCC拓扑网络设计方法是有效的。

4 结论

文中采用了一种双边LCC 拓扑网络设计方 法用于设计磁耦合谐振式无线充电系统。通过 分析双边LCC 拓扑网络主电路的数学模型,确定 耦合谐振条件、线圈电压电流、补偿电感电压电 流、传输功率等与负载、耦合系数及频率之间的 关系,从最小传输功率、最小传输效率、最大传输 距离、极限偏移量等参数入手,取得原、副边线圈 及其补偿电感相对应的电感比,不断迭代优化得 到最佳谐振网络匹配参数,设计了6.6 kW无线充 电磁耦合机构。最后搭建全SiC器件无线充电系 统实验平台进行验证,实验数据与仿真结果基本 一致。本文对无线充电系统双边LCC拓扑的电 路特性分析和参数设计具有一定的指导意义,为 无线充电系统优化研究提供依据。

参考文献

- KARALIS A, JOANNOPOULOS J D, SOLJACIC M. Wireless non-radiative energy transfer[J]. Visions of Discovery New Light on Physics, 2006.
- [2] 刘振威,张晓丽,陈天锦,等.电动汽车无线充电新型DD 耦合机构设计与优化[J].电测与仪表,2020,57(12):98-104.

LIU Zhenwei, ZHANG Xiaoli, CHEN Tianjin, et al. Design and optimization of new DD coupling mechanism for wireless charging of EV[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(12): 98–104.

- [3] 董纪清,杨上苹,黄天祥,等.用于磁耦合谐振式无线电能 传输系统的新型恒流补偿网络[J].中国电机工程学报, 2015,35(17):4468-4476.
 DONG Jiqing, YANG Shangping, HUANG Tianxiang, et al. A novel constant current compensation network for magneticallycoupled resonant wireless power transfer system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17):4468-4476.
- [4] 程志远,李峥,吴龙飞,等.无线充电系统磁环条幅型磁耦合 机构研究与优化[J].电气传动,2022,52(14):32-37.
 CHENG Zhiyuan, LI Zheng, WU Longfei, et al. Research and optimization of magnetic ring strip type magnetic coupling mechanism for wireless charging system[J]. Electric Drive, 2022,52(14):32-37.
- [5] 樊京,李定珍,张世杰,等.无线电能传输非线性拓扑补偿 结构研究[J]. 仪表技术与传感器,2020(5):107-112.
 FAN Jing, LI Dingzhen, ZHANG Shijie, et al. Research of nonlinear compensation topology for wireless power transmission system[J]. Instrument Technique and Sensor, 2020(5): 107-112.
- [6] 冯帆,王俊峰,王国东.四线圈谐振式无线电能传输系统的 拓扑结构分析[J].电源学报,2018,16(6):131-136.
 FENG Fan, WANG Junfeng, WANG Guodong. Topology analysis of four-coil resonant wireless power transmission system
 [J]. Journal of Power Supply, 2018,16(6):131-136.
- [7] LI S, LI W, DENG J, et al. A double-sided LCC compensation network and its tuning method for wireless power transfer[J].
 IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(6): 2261–2273.
- [8] FEI L, HUA Z, HOFMANN H, et al. A dual-coupled LCCcompensated IPT system to improve misalignment performance [C]//2017 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: (下转第49页)

V2G模式下的电动汽车充电站分层无功调度策略

何奎元¹,于江涛^{1,2},朱棋¹,蔡慧^{1,2},郭倩¹,卫东¹

(1. 中国计量大学 机电工程学院, 浙江 杭州 310018;

2. 中国计量大学 浙江省智能制造质量大数据溯源与应用重点实验室,浙江 杭州 310018)

摘要:针对大规模电动汽车充电负荷对配电网产生的不利影响,基于车辆到电网(V2G)技术,提出了结合 非支配排序遗传算法和全局目标的局部优化算法的V2G无功调度策略。上层架构是基于非支配排序遗传算 法的电动车有序充电策略,进行以负荷均方差、充电成本和电压偏移率为目标的用户开始充电时间分布的标 准差的寻优,得到满足用户需求的开始充电参数;下层架构是全局目标的局部优化算法,对可提供无功补偿的 车辆,进行以电压偏移率为目标的无功补偿量的寻优。最后以IEEE100节点系统为例进行仿真,发现该方法 能为充电站的经营者提供更佳的负载峰谷差率、充电成本、电压质量等多种充电方式,分层的调度策略与单层 调度策略相比,能更好地保障电网的安全性和经济性。

关键词:车辆到电网;无功补偿;调度架构;电压偏差;充电器 中图分类号:TM73 文献标识码:A DOI:10.19457/j.1001-2095.dqcd24933

Hierarchical Reactive Power Scheduling Strategy for Electric Vehicle Charging Stations in V2G Mode

HE Kuiyuan¹, YU Jiangtao^{1,2}, ZHU Qi¹, CAI Hui^{1,2}, GUO Qian¹, WEI Dong¹

(1.College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China; 2.Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Quality Big Data Tracing and Analysis of Zhejiang Province, China Jiliang University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China)

Abstract: Aiming at the adverse effects of large-scale electric vehicle charging load on the distribution network, based on vehicle to grid (V2G) technology, a V2G reactive dispatching strategy combining the non-dominated sorting genetic algorithm and the local optimization of global objectives algorithm was proposed. The superstructure was based on the ordered charging strategy of electric vehicles based on the non-dominating ranking genetic algorithm, and the standard deviation of the user's starting charging time distribution was optimized with load mean square deviation, charging cost and voltage offset rate as the target, and the starting charging parameters that meet the needs of users were obtained. The sub-architecture was a local optimization algorithm for global targets, which optimizes the amount of reactive power compensation with voltage offset rate as an example to simulate, it was found that this method can provide charging station operators with better load peak-valley difference, charging cost, voltage quality and other charging methods, and the hierarchical scheduling strategy can better ensure the safety and economy of the power grid compared with the single-layer scheduling strategy.

Key words: vehicle to grid(V2G); reactive power compensation; scheduling architecture; voltage deviation; recharger

新能源汽车的问世,使人们的生活和能源结构发生了巨大的变化。尽管电动汽车使用的电能会引起发电厂产生污染,但与传统燃料汽车不同,通过电代替汽油来作为汽车的动力,可以有

效降低二氧化碳的排放量,从而降低矿物能源的 消耗^[1-2]。采用新能源车作为家用车辆,可以很好 地克服传统燃料车所造成的问题。为了更好地 发展新能源汽车,许多学者进行了大量的研究,

作者简介:何奎元(1999—),男,硕士,主要研究方向为电动汽车充电站优化控制,Email:2870880371@qq.com

通讯作者:蔡慧(1980—),男,博士,教授,主要研究方向为电力电子技术与电气传动、新能源发电技术,Email:caihui@cjlu.edu.cn

基金项目:浙江省基础公益项目(LGG22E070003);浙江省属高校基本科研业务费专项资金资助项目(2021YW42)

从车辆到电网(vehicle to grid, V2G)的角度出发, 探讨了电动汽车充放电的可行性^[3-4]。当海量电 动汽车接入电网充电,其形成的负荷高峰对配电 网的正常运行会造成一定干扰,进一步引发线路 过载、谐波污染等电能质量问题,给电网的良好 运行带来困扰。

目前国内外有关V2G技术的研究大多是围绕着V2G技术对电网进行削峰填谷展开的^[5],而随着V2G技术的广泛使用,许多学者对电动汽车 作为转移的负载、充电功率的大小、控制策略等 问题也进行了深入的探讨^[6]。这些研究的目标是 在充电站内将电动汽车作为分布式电源,在电网 有需要的时候,它就会被用来供电。然而,问题 也随之产生,这会导致电动汽车充电和放电的频 率增大,从而导致电池的损耗增大,缩短电池的 使用年限,提高了用户的使用费用^[7]。

充电桩是电动汽车的基础设施,但随着新能 源时代的到来,充电桩可以通过V2G技术加入到 补偿服务中,使其成为电动汽车的无功补偿装 置¹⁸¹,这是一个新的研究方向。电动汽车可以在 充电的同时进行无功补偿,利用充电桩的额外容 量来进行无功补偿,不会增加电动汽车电池的放 电次数,既能有效地解决电网的电压质量问题, 又能有效地解决电动汽车电池在无功补偿后的 损耗,从而极大地改善了经济性¹⁹。因此,把电动 汽车与充电桩相结合作为一种新型的无功补偿 设备,不仅可以保障配电网的电压稳定,而且可 以充分地利用充电桩的额外容量,具有很大的应 用价值。传统的无功补偿策略是针对固定位置 的补偿设备的,而对于充电站这样的随机负荷系 统并不太适合,且不能有效地对电网的电压进行 调节。因此,研究V2G参与无功优化的策略是十 分必要的。

在充电站算法调度方式中,文献[10]提出了 一种可以进一步提高电动汽车充电和换电池决 策的便利性策略,该调度策略能够同时减少充电 等待时间,并提高充电站的运行效率。文献[11] 提出了一种新的鲁棒策略来提供最优竞价曲线, 可以在电价不确定的情况下以经济的价格获得 满足系统需求所需的电力。文献[12]探讨了基于 优先级排序的电动汽车充电策略优化问题,该方 案能够帮助电动汽车运营商制定有效的充电方 案。文献[13]提出了一种电动汽车与风电协同调 度模式,提高了电动汽车的低碳和经济效益。以 上文献表明充电调度问题目前已有多方面的研究,充电站运营商可以从充电等待时间、充电成本、经济效益等方面求解最优充电方案。但是以上研究中,算法的寻优目标单一,只能对某一个目标进行优化。

针对以上问题,本文对基于V2G技术的分层 无功调度策略进行了研究。首先,对分层无功调 度分别提出其相应的无功调度控制策略,上层为 电网-充电站运营商层,下层为充电站运营商-用 户层;然后,使用充电站模型对该方法进行仿真, 以验证该方法的正确性。控制策略上提出采用 非支配排序遗传算法(the non-dominated sorting genetic algorithm,NSGA-II)结合全局目标的局部 优化(local optimization of global objectives,LOGO) 算法的方法对三类用户充电站模型求解,并且所 提方法可以直接对三个目标函数同时进行寻优。 本文提出的调度策略给充电站运营商提供了可 多目标选择的充电方案,可有效地缓解电网的负 担,同时对充电站运营商的电网安全、充电经济、 电能质量方面进行了改善。

1 基于V2G技术的充电站分层无功 调度策略

充电站运营商通过充电桩向用户下达充电 指令,为了使V2G无功补偿更好地在电网调度中 发挥作用,采用图1所示的充电站分层调度架构。 其中,电网作为充电指令的发送端,充电站运营 商作为接收端,用户作为执行端,而执行器是充 电桩^[14-15]。



图1 充电站分层调度架构图

Fig.1 Dispatching architecture of charging station

分层调度架构上层为电网-充电站运营商 层,下层为充电站运营商-用户层。首先根据充 电站电网的特点,制定充电站分层调度架构以及 无功优化实现流程。在此基础上,结合上层的车 网特性,提出基于非支配遗传算法的上层调度策 略^[16-17],以用户开始充电时间分布的标准差作为 优化变量,在此基础上确定可提供无功补偿车辆 数,再把可以补偿无功容量的车辆数及车辆停放 节点位置输入给下层调度策略。下层考虑到充 电桩的容量限制和下层车网特性,采用基于全局 目标的局部优化算法,对可提供无功补偿的车 辆,进行以电压偏移率为最优目标,以有功充电、 无功补偿功率比例为优化变量的寻优,最后把下 层最优电压偏移率返回给上层,与电网负荷波动 率、充电成本共同作为上层的寻优目标。

1.1 上层(电网-充电站运营商)控制策略

上层调度以负荷均方差、充电成本、下层寻 优得到的电压偏移率为调度优化目标。三个优 化目标均是求最小值,即负荷均方差最小时,负 荷波动最优;充电成本最小时,经济最优;电压偏 移率最小时,电压质量最优。目标函数拟定为三 个,分别为:负荷均方差、充电站用户的充电成本 和电压偏移率。具体介绍如下:

1)负荷均方差:

min *LPV*(*t*) = *E* { $\sum [P_{l+ex}(t) - E(P(t_s))]^2$ }(1) 式中:*LPV*(*t*) 为负荷均方差值; $P_{l+ex}(t)$ 为当前功 率; *t*_s为电动汽车开始充电时间。

2) 充电站用户的充电成本:

$$\min C(t_{s}) = \sum_{i=1}^{n} [p_{v}P_{n}t_{v}(i) + p_{p}P_{n}t_{p}(i)] \quad (2)$$

式中:n为电动车数量; p_v 为谷时段电价; P_n 为充 电功率; $t_v(i)$ 为第i辆车在谷时段的充电时间; p_p 为峰时段电价; $t_p(i)$ 为第i辆车在峰时段的充电 时间。

3) 电压偏移率:

$$V_{\text{pianyi}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} [(V_{\text{biaozhun}} - V^{i})/V_{\text{biaozhun}}]}{N}$$
(3)

式中:V_{biaozhun}为电网中的标准电压参考值;N为充 电站的节点总数;Vⁱ为第i节点的电压。

以用户开始充电时间分布的标准差作为上 层优化变量,在不影响大多数使用者的充电习惯 的前提下,将上层优化变量的取值范围设置为0~ 50%,对优化变量即用户开始充电时间分布的标 准差进行寻优后,将充电指令发送给充电桩,由 充电桩完成指令,上层优化采用非支配排序遗传 算法^[18]。

约束条件除电池容量限制、补偿容量限制之 外,还包括以下优化模型控制变量的约束:

1)谷时段开始时刻约束:

$$t_{\rm vsmin} \le t_{\rm vs} \le t_{\rm vsmax} \tag{4}$$

式中: t_{vsmin} , t_{vsmax} 分别为谷时段开始时刻的上、下限值。

2)谷时段时长约束:

$$\leq \Delta t \leq \Delta t_{max}$$
 (5)

式中: Δt_{max} , Δt_{min} 分别为谷时段时长的上、下限值。 3)峰时段电价约束:

 Δt_{\min}

$$p_{\text{pmin}} \le p_{\text{p}} \le p_{\text{pmax}} \tag{6}$$

式中: ppmax, ppmin分别为负荷峰时段电价的上、下限值。

4)谷时段电价约束:

$$p_{\rm vmin} \le p_{\rm v} \le p_{\rm vmax} \tag{7}$$

式中:*p*_{vmax},*p*_{vmin}分别为负荷谷时段电价的上、下限值。

由于电动汽车充放电双层优化模型具有多 种约束条件,同时遗传算法进化特性决定了在搜 索时不必过多地关注约束条件是线性或非线性, 而直接使用目标函数为搜索信息,灵活性极强。 故上层优化采用了非支配排序遗传算法。

1.2 下层(充电站运营商-用户)控制策略

下层调度主要是对有功充电、无功补偿功率 比例进行寻优,电网部门通过充电站运营商将无 功补偿量指令发送到充电桩,然后由能够提供无 功补偿量的充电站进行功率分配。电动汽车用 户与充电站运营商之间通过信息交互,可以获取 或变更自己的充电计划。控制流程如图2所示。



Fig.2 Lower level control flow chart

由于后文要用三类用户的充电站系统作为 测试对象,所以充电桩根据充电需求不同设置为 空闲(*flag* = 0)、居民区慢充(*flag* = 1)、公共区标 准充(*flag* = 2)、商业区快充(*flag* = 3)四种状态, 分别对应四种无功补偿容量0, q_1 , q_2 和 q_3 。调度 所需的无功容量由数据驱动局部全局目标优化 算法计算得到,其中, x_1 , x_2 , x_3 为充电桩状态值 *flag*=1,2,3的三类充电桩参与调度的数量;*S*为 充电桩的额定容量; p_{ch1} , p_{ch2} , p_{ch3} 为*flag*=1,2,3的 三类充电桩所对应的充电功率;n为*flag*≠0的充 电桩个数; n_1 , n_2 , n_3 为n中可以提供无功补偿的个 数; Q^* 为无功补偿容量的总量; Δq 为额外可能的 容量。按下式线性规划分配:

$$\begin{cases} x_1q_1 + x_2q_2 + x_3q_3 = Q^* & x_1, x_2, x_3 \in N \\ q_1 = \sqrt{(S^2 - p_{ch1}^2)} - \Delta q & x_1 \in [1, n_1] \\ q_2 = \sqrt{(S^2 - p_{ch2}^2)} - \Delta q & x_2 \in [1, n_2] \\ q_3 = \sqrt{(S^2 - p_{ch3}^2)} - \Delta q & x_3 \in [1, n_3] \end{cases}$$

$$(8)$$

图2中下层控制目标是充电负荷均方差,控制条件是在满足充电功率圆的限制范围内进行补偿,控制变量是无功补偿功率。

2 基于分层调度的V2G无功优化策 略求解

根据上述介绍的分层调度的 V2G 无功优化 策略对充电站数学模型进行求解,具体求解流程 如图 3 所示。采用蒙特卡洛法对用户充电行为进 行模拟,其核心是多次相互独立的模拟随机变量 产生的值之和服从正态分布,这符合用户的充电 习惯,其均值收敛于函数期望值^[19-20]。



- 图3 基于分层调度的V2G无功优化策略求解步骤图
- Fig.3 Solution steps of V2G reactive power optimization strategy based on hierarchical scheduling

当充电站汽车总数为n时,使用蒙特卡洛法

模拟电动车辆充电负荷流程如图4所示。



图4 用蒙特卡洛法模拟电动车辆充电负荷流程图

Fig.4 Flow chart of simulating charging load of electric vehicle by Monte Carlo method

使用蒙特卡洛法模拟充电站充电行为后,采 用非支配排序遗传算法求解目标函数,在充电状 态分布确定的情况下,再应用数据驱动局部全局 目标优化算法对各个节点的无功补偿量进行寻 优求解,采取先进行上层调度后进行下层调度的 调度策略。具体的求解过程为:

1)收集充电站系统相关数据;

2)充电站运营商采用蒙特卡洛法模拟充电 站内用户充电行为,确认参与无功补偿服务的用 户数量;

3)根据电网电压、可提供无功补偿容量的电 动车的情况,应用非支配排序遗传算法对目标函 数下的三类充电用户的开始充电时间分布的标 准差进行优化求解;

4)确定可进行无功补偿车辆的节点位置;

5)应用数据驱动局部全局目标优化算法对 停有电动车节点的充电桩的有功充电、无功补偿 功率比例寻优求解,并通过在曲面图中得到最适 合的补偿量进行补偿。数据驱动是将数据进行 组织形成信息,并对相关的信息进行整合和提 炼,然后经过拟合形成曲面图;

6) 若达到最大迭代次数, 输出 Pareto 解集方案, 否则执行步骤3)。

2.1 上层控制策略求解步骤

非支配排序遗传算法的主要步骤是:首先生 成取值范围内的初始种群,每个种群通过适应度 函数得到适应度,然后通过非支配排序选择排名 最优的个体,然后是次优的个体,以此类推,直到 选择的种群个数达到种群的最大规模数,没有选 择的种群因为适应度低,不符合要求被淘汰。然 后选择的种群再通过选择、变异、交叉操作生成 新的种群,重复迭代后得到最优的种群^[21-22]。非 支配排序遗传算法在标准遗传算法的基础上增 加了非支配排序操作。

多目标问题实际上是一个向量优化问题,帕 累托优胜原则可以更好地解决电动车充电优化 问题。帕累托最优原本是指变量在配置时的一 种理想状态,而在多目标优化领域中被表示为一 组各个目标都没有同时改进余地的解集。解集 中的各个解没有相互支配的关系,它们的优缺点 也没有可比性。决策者需要根据问题的需要对 被选为最优个体的特定个体进行折中选取。

由于变异和交叉操作很难保证均匀地生成 种群,导致迭代陷入局部最优,无法达到全局性 的寻优,引入小生境方法可以避免这种情况。种 群的适应度值根据共享半径内单个*x*的新适应度 值重新分配,下式为新的适应度函数:

$$f'(x) = \frac{f(x)}{\sum_{x \in P} s[d(x, y)]}$$
(9)

其中

$$s[d(i,j)] = \begin{cases} 1 - \left(\frac{d(i,j)}{\sigma_{\text{share}}}\right)^{\alpha} & d(i,j) < \sigma_{\text{share}} \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$
(10)

式中:s为共享函数,代表着个体x_i和小生境种群 内其余个体之间的关系;x,y为两个个体;P为当 前种群;f(x)为原来指定的适应度值;d为距离 函数;σ_{share}为共享半径;α为常数。

若个体的虚拟适应度值一样,则优先考虑小 生境范围内密度较低的个体。

设计上层电网-充电站运营商控制流程如图 5所示,用非支配排序遗传算法进行优化计算。 负荷均方差、充电站用户充电成本和电网电压偏 移率是上层调度的优化目标,调度的优化参数是 三类用户开始充电时间分布的标准差。主要调 度流程如下:

1)生成取值范围内的规模为N的初始种群 P_{i} ,经过选择、交叉、变异等操作产生新种群 Q_{i} ;

2)将生成的新种群 Q_i 与初始种群 P_i 合并成 规模为2N的种群 R_i ,然后对 R_i 进行小生境方法 的非支配排序和拥挤度计算;

3)从 R_i 中选择N个较优个体,先将 F_1 中的个体放到新父代种群 P_{i+1} 中,如果 F_1 中的个体数小于N,则将 F_2 中的个体放到 P_{i+1} 中;

4)若P_{t+1}中个体数目大于N,那就需要根据



图5 电网-充电站运营商控制流程图

Fig.5 Power grid-charging station operator control process 最后一层中个体的拥挤度进行选择,以确保新父 代种群个体数目为N;

5) 对种群 *P*_{*i*+1} 进行交叉、变异等操作产生新 种群 *Q*_{*i*+1};

6)若迭代次数达到设置的最大迭代数,则退 出,否则程序执行步骤2)。

2.2 下层控制策略步骤

为了使充电桩只需要通过访问局部变量充 电功率 P_{charge} 、无功补偿量 $Q_{compense}$,就可以实现对 全局变量目标值电压偏移率 V_{pianyi} 的优化,必须找 出全局变量和局部变量之间的关系。因此,本文 采用了数据驱动的方法,其中无功调度优化在充 电桩视在功率范围内。在每个补偿步长上运行 最优潮流算法,对于每一个 P_{charge} , $Q_{compense}$ 值,得到 相应的 V_{pianyi} 值。在此基础上,将两个局部变量作 为x,y轴,以优化全局变量作为z轴绘制出三维图 形。然后利用 Matlab 软件中的拟合工具箱对函 数曲面进行拟合,用来确定曲面中的最优值,其 中曲面为二次函数曲面。

数据驱动运行在带有基础负载、电动车无功 补偿、充电桩的容量约束等条件下,且容量一定 的情况下。上述的约束条件在功率圆的范围内, 在满足充电功率的前提下,看能补偿多少的无功 功率给车网。充电桩无功运行功率限制域如图6 所示。最优的局部变量为图7和图8中标出点对 应的x,y值。因此,对于特定的电网拓扑,即使在 不同的运行条件下,散布在空间中的每个变量点 与目标函数也存在一定的联系,这种联系受双向 充电桩系统中最大无功容量约束。



Fig.6 Reactive operation power limitation domain of charging pile

由功率圆可知,第i节点的充电功率 P_{charge}^{i} 表示为

$$P_{\rm charge}^{i} = \tau \times S^{i} - P_{\rm loss}^{i} \tag{11}$$

式中: τ 为单位为0.1 的步长; Sⁱ为第 i 台充电桩的 额定容量; Pⁱ_{loss} 为第 i 台充电桩在充电时的有功 功率损耗。

在不同的充电环境中,*P*^{*i*}_{loss}会实时变化,本文 在不考虑环境变化且充电效率为90%时,*P*^{*i*}_{loss}恒 定不变,为*P*^{*i*}_{charge}的0.1倍。因此,该方法需要的数 据可以在电网互联过程中通过现有系统的步进计 算,从而实现自动化遍历。在步进计算后,若数据 量比较大,可以根据数据绘制图从而找出最优值 以及对应的比例。由于数据的步进单位为0.1,从 而可以针对变量与目标值进行绘图,不需要使用 高采样率来生成图中的数据。如图7所示,式(8) 中的关系对于欠压和过压场景都是有效的。

同理,第i节点无功补偿量 Q^{i}_{compense} 为

 $Q_{\text{compense}}^{i} = \sqrt{1 - \tau^{2}} \times S^{i} - Q_{\text{loss}}^{i}$ (12) 式中: Q_{loss}^{i} 为充电桩在补偿充电时的无功功率损 耗,大小为0.1倍的 Q_{compense}^{i}

将得到的有功、无功补偿值代入到如下式所示的潮流计算公式中,可以计算出下一节点电压 Vⁱ⁺¹值:

$$V^{i+1} = \{ [V^{i} - \frac{(P^{i} + P^{i}_{charge})R^{i} + (Q^{i} - Q^{i}_{compense})X^{i}}{V^{i}}]^{2} + [\frac{(P^{i} + P^{i}_{charge})R^{i} - (Q^{i} - Q^{i}_{compense})X^{i}}{V^{i}}]^{2} \}^{\frac{1}{2}}$$

$$(13)$$

式中:Vⁱ为当前节点的电压值;Pⁱ为当前节点的 44 有功功率;Rⁱ为当前节点与下一节点间的电阻;Qⁱ 为当前节点的无功功率;Xⁱ为当前节点与下一节 点间的电纳。

有了上述参数,即可由式(3)得出目标值电 压偏移率V_{pianyi}。其中Vⁱ作为步进计算的电压值, 参数的分辨率为0.1,所以得到的结果也是由步 长为0.1的单位构成。

图7为该算法应用实例,绘制了以节点电压 为z轴的图,图8为以电压偏移率为z轴的图,可 明显得到在约束条件下z轴最小值对应的x,y值, 即可得出最优充电功率因数。



总体的控制策略是分布式优化,即将整个车 网的节点分为单个节点进行控制。但考虑到节 点控制的优先级,需要由本地和邻近节点的电压 幅值、电压相位角、母线导纳元素来确定电动车 的充电功率和无功输出^[23]。

设定整个充电站的充电桩都具有额外容量, 这样每个充电桩满足用户期望荷电量之后均能 进行无功补偿服务。充电桩可以运行在四个象 限,但由充电桩模型可以得出,为避免由于无功 补偿导致额外的充放电次数而增加电池损耗,使 充电桩运行在第一象限。由于电池的充电功率 是由车辆的类型决定的,因此变量设置步长为充 电桩容量的0.1倍。根据数据点拟合函数后,选 择z轴最小点x,y的值作为补偿。全局目标的局 部优化无功补偿的流程如图9所示。



3 仿真案例分析与讨论

为了验证 V2G 无功分层调度策略对充电站 模型应用的有效性,以美国电气电子工程师学会 标准的 IEEE100 充电站系统为算例进行了仿真 分析。其中参考了如图 10 所示的某小区复用充 电站,根据充电桩的位置绘制如图 11 所示的 IEEE100节点图。

1)充电站居民区充电模式又称为慢充电方 式。取充电桩最大电流为*C*,慢充充电电流一般 为0.1*C*~0.2*C*,平均充电时长为6~9h。该类用户 的充电需求、用车行为和充电时间等分布特征 是相对固定的^[24]。上、下班时间(06:30—09:00, 17:00—19:00)是居民区充电站运行的高峰时 间,日用里程为10~50 km,电池剩余电量服从*N* (0.55,0.62²)分布;

2)充电站公共区充电模式又称为标准充电 方式。某小区的电动车充电站出行数据表明:该 区域用户平均每天需要充电2次,其中(11:30— 14:30,19:00—21:00)为电动车充电接入高峰时 刻,上、下班高峰(06:00—07:30,16:00—17:00) 为电动车充电退出高峰时刻。该区域内车辆,白 天平均充电时间为3h,夜间平均充电时间约为 10h,开始充电时荷电量*SOC*集中在20%~60%, 若按照充电功率5kW/h计算,车辆充满所需平均 时间为3.5 h^[25];

3)充电站商业区充电模式又称为快速充电 方式。停靠在商业区的用户的出行规律在工作 日和节假日并不相同。在工作日,商业区用户和 居民区用户的出行规律基本一致;在节假日,出 行时间则分散在整个白天^[26]。节假日期间,车辆 的日平均行驶里程在40~60 km之间,而在工作日 时,车辆的日平均行驶里程在20~50 km之间。充 电时间约3~5 h,日均停泊20 h。







Fig.11 Node diagram corresponding to the improved test system

调度时间为24个时段^[27],含100个工作在四 象限的充电桩和100台在充电站活动的电动车。 电动汽车拟定为比亚迪的F3型号,假定三类车辆 所占比例分别为50%,30%,20%。仿真数据为: 种群大小*NIND*取100,迭代次数*MAXGEN*取 100,变异概率*P*_m取0.03,交叉概率*P*_e取0.8,收敛 值取1e⁻⁶,独立运行20次,下层LOGO算法中的步 进单位τ取0.1。

在 Matlab R2020a 环境下建立充电站系统仿 真模型,对本文提出的分层调度策略求解方法进 行验证。

在仿真过程中,采用分层无功调度策略求解 时,共得到70个帕累托前沿点,即70组三类充电 用户开始充电时间分布的标准差值,这70组标准 差值的具体以及其对应的三个目标值信息如表 1、表2所示。

表1 Pareto解集对应区域用户开始充电时间分布的标准差值表

Tab.1 Pareto solution set table of standard deviation value of the distribution of user start charging time in corresponding region

Pareto 解序号	居民 区	公共 区	商业 区	Pareto 解序号	居民 区	公共 区	商业 区
1	0.94	1.51	2.58	10	0.94	2.16	6.42
2	0.94	1.65	6.42	:	÷	÷	÷
3	0.94	1.51	2.58	65	2.65	4.39	2.35
4	0.94	1.51	6.32	66	2.65	4.39	2.35
5	0.94	1.51	6.32	67	2.80	4.40	2.61
6	0.94	1.97	6.42	68	2.81	4.33	2.61
7	0.94	2.16	6.42	69	2.82	4.39	3.84
8	0.94	2.63	6.42	70	2.82	4.30	3.84
9	0.94	4.37	2.60	—	—	_	—

表2 多目标优化的Pareto解集对应目标函数值表

Tab.2 The Pareto solution set of multi-objective optimization

corresponds to the objective function value table

Pare- to解 序号	全天负 荷均方 差	网络 偏移 率	充电成 本/元	Pareto 解序 号	全天负 荷均方 差	网络 偏移 率	充电 成本/元
1	51.587	0.040	1 384.95	10	50.535	0.041	1 359.35
2	52.443	0.040	1 384.42	:	÷	÷	:
3	51.638	0.040	1 386.22	65	16.920	0.044	1 119.31
4	52.680	0.041	1 388.31	66	17.251	0.044	1 130.60
5	53.247	0.040	1 393.79	67	15.227	0.044	1 102.93
6	51.594	0.041	1 371.45	68	15.614	0.043	1 116.51
7	50.878	0.041	1 363.25	69	15.726	0.045	1 120.41
8	49.055	0.040	1 335.08	70	14.893	0.045	1 112.19
9	46.321	0.039	1 287.80	_	_	—	_

此外,这70个帕累托前沿点如图12所示,其 中,*x*,*y*,*z*轴分别为全天负荷均方差、充电成本和 电压偏移率。

1)当负荷波动最优时,即负荷均方差为 14.893时,充电成本为1112.19元、电压偏移率为 0.045,对应的三类用户开始充电时间分布的标准 差方案分别为2.82,4.30,3.84。叠加基础负荷后 全天的充电负荷图如图13所示,充电站基础负荷 在电动车进行无序充电后,会造成电网峰谷差率 的进一步增大。图14为充电站系统在无序充电 和分层调度策略调度时全天负荷比较图,从中可 得到在上级有序调优策略的调度下能够有效改 善无序充电带来的峰谷加剧问题。在分别进行 无序充电和分层调度策略充电时的全天负荷 均方差值如表3所示,叠加基础负荷前的全天负荷 后的全天负荷均方差值由94.489减少至89.103。



运行工况	无序充电	分层调度策略充电
充电负荷均方差	22.310	14.893
充电加基础负荷均方差	94.489	89.103

2)当经济最优时,即充电成本为1102.93元时,负荷均方差为15.227、电压偏移率为0.044,对应的三类用户开始充电时间分布的标准差方案分别为2.80,4.40,2.61。在此方案下,无序充电和分层调度策略充电下的全天充电成本曲线如图15所示,可以观察到,经过本文提出的充电站分层调度策略调度后,充电成本如表4所示,从1360.06元减少至1102.93元,节约了大约19%的



1	1	8 8
运行工况	无序充电	分层调度策略充电
充电成本/元	1 360.06	1 102.93

3)当电压质量最优时,即电压偏移率0.039 时,负荷均方差为46.321、充电成本为1287.80 元,对应的三类用户开始充电时间分布的标准差 方案分别为0.94,4.37,2.60。图16为固定时段内 单个节点电压在用电高峰期间在以下五种工况 下的波形图:基础负荷工况a;无序充电的工况b; 无序充电过程中应用下级无功调度策略进行无 功补偿的工况c;上级有序充电的工况d;分层无 功调度策略的工况e。从图中可以得知,使用分 层无功调度策略寻优后的充电方案后,整体节点 的电压质量明显得到了改善,并且分层调度策略 的改善效果是优于上层、下层单层调度策略的。



图 17 为全天时段所有节点的电压偏移率平均值,计算出如表5 所示的五种工况下的节点电压偏移率平均值。对比可以看出,全天电压偏差平均值在分层无功调度策略调度后最低,且均符合在0.05 以下;工况 c 全天变化相对剧烈,这种工

况下的电压偏差变化主要原因是V2G参与无功 补偿降低电压偏移率造成的。上层调度下结合 下级无功补偿时,电压偏移率相较于无补偿时有 明显的降低,但相应的峰时段变化同样明显。



图 17 电压质量最优时的电压偏移率优化结果对比图

Fig.17 Comparison diagram of voltage offset rate optimization results when voltage quality is optimal

表5 电压偏差平均值与网损平均值表

Tab.5 Table of average value of voltage deviation and average value of network loss

		0			
补偿工况	工况 a	工况b	工况c	工况 d	工况 e
电压偏移率	0.052	0.062	0.047	0.055	0.020
平均值	0.052	0.065	0.047	0.055	0.039

在选择负荷波动最优的方案后,全天的负荷 均方差值从22.310减少至14.893;选择经济最优 的方案后,充电成本从每天1360.06元减少至每 天1102.93元;选择电压质量最优的方案后,各节 点电压偏移率从0.063减少至0.039,并且有效地 降低了网损。

以上分析验证了本文提出的分层调度策略 求解方法的有效性,该方法能为充电站的经营者 提供更佳的负载峰谷差率、充电成本、电压质量 等多种充电方式的选择。

4 结论

本文利用 IEEE100 充电站系统作为目标电 网,对结合非支配排序遗传算法和全局目标的局 部优化算法的 V2G 无功调度策略进行仿真验证。 首先利用蒙特卡洛模拟法模拟充电行为,得到充 电负荷的概率密度、全天的充电负荷曲线,再结 合前推回代潮流计算方法得到各个节点的实时 电气参数。利用基于 V2G 技术的充电站分层无 功调度策略进行优化后得到的 70 组三类用户充 电方案,进行负荷波动、经济、电压质量最优去选 择充电方案,在帕累托解集图上选择侧重的充电 方案。分别对三个目标值最优时选择的充电方 案进行结果分析,仿真结果表明在使用本策略调 度后的充电方案中,充电站运营商可以自由地从 电网安全、充电经济和电能质量方面去选择,验 证了本文策略的可行性和优越性。

根据目前的发展趋势,到2030年,新能源汽 车很有可能达到50%的市场份额,而V2G技术也 越来越成为研究热点。本文在现有的研究基础 上,对V2G无功优化方面进行了一定的完善,但 仍然有不少不足之处:

1)本文仅对用户参与V2G无功优化时的充 电成本进行寻优,而未考虑到用户参与无功补偿 的奖赏机制。

2)本文仅对充电站数学模型拟定了三条针 对电网和充电站运营商的目标函数,而未考虑到 用户方面,例如对充电站的满意度。

3)本文仅针对某一款电动车进行了试验,并 没有测试其他车型,希望日后可以继续研究多型 号电动车的V2G无功优化策略。

参考文献

[1] 刘晓飞,张千帆,崔淑梅.电动汽车 V2G 技术综述[J]. 电工技 术学报,2012,27(2):121-127.

LIU Xiaofei, ZHANG Qianfan, CUI Shumei. Review of electric vehicle V2G technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2):121–127.

- [2] 杨俊,文福拴,汪震,等.电动汽车与电力系统的交互作用
 [J].电力建设,2015,36(7):14-24.
 YANG Jun, WEN Fushuan, WANG Zhen, et al. Interactions between electric wehicles and power systems[J]. Electric Power Construction,2015,36(7):14-24.
- [3] 张海鹏,林舜江,刘明波,等.低压配电网无功补偿及效益评估系统的开发和应用[J].电力系统保护与控制,2016,44
 (4):129-136.

ZHANG Haipeng, LIN Shunjiang, LIU Mingbo, et al. Development of low voltage distribution networks reactive power compensation and benefit assessment system and its application[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4):129–136.

- [4] KISACIKOGLU M C, OZPINECI B, TOLBERT L M. EV/ PHEV bidirectional charger assessment for V2G reactive power operation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28 (12):5717–5727.
- BUJA G, BERTOLUZZO M, FONTANA C. Reactive power compensation capabilities of V2G-enabled electric vehicles[J].
 IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(12):9447– 9459.
- [6] KISACIKOGLU M C, OZPINECI B, TOLBERT L M. Examination of a PHEV bidirectional charger system for V2G reactive power compensation[C]//2010 Twenty-Fifth Annual IEEE App-

lied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) , Palm Springs, CA, USA, 2010:458-465.

- [7] KESLER M, KISACIKOGLU M C, TOLBERT L M. Vehicle-togrid reactive power operation using plug-in electric vehicle bidirectional offboard charger[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(12):6778–6784.
- [8] TAN K M, RAMACHANDARAMURTHY V K, YONG J Y. Three-phase bidirectional electric vehicle charger for vehicle to grid operation and grid voltage regulation[C]//2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), Busan, Korea(South), 2016:7-12.
- [9] 樊英,张丽,薛钟兵,等.基于 V2G 的无功功率补偿技术[J]. 电网技术,2013,37(2):307-311.
 FAN Ying, ZHANG Li, XUE Zhongbing, at al. Reactive compensation technology based on vehicle to grid[J]. Power System Technology, 2013,37(2):307-311.
- [10] LUO Y, FENG G, WAN S, et al. Charging scheduling strategy for different electric vehicles with optimization for convenience of drivers, performance of transport system and distribution network[J]. Energy, 2020, 194(Mar. 1):116807.
- [11] GUO J, LV Y, ZHANG H, et al. Robust optimization strategy for intelligent parking lot of electric vehicles[J]. Energy, 2020, 200(Jun. 1): 117555.
- [12] NI F, YAN L, WU K, et al. Hierarchical optimization of electric vehicle system charging plan based on the scheduling priority
 [J]. Journal of Circuits, Systems and Computers, 2019, 28(13); 1950221.
- [13] YANG F, CHEN L. Wind power cooperative scheduling strategy considering the life cycle carbon emissions of EV[C]//2018 3rd International Conference on Electrical, Automation and Mechanical Engineering(EAME 2018), Paris, France, 2018:153– 159.
- [14] CHOI W, LEE W, SARLIOGLU B. Reactive power compensation of grid-connected inverter in vehicle-to-grid application to mitigate balanced grid voltage sag[C]//2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting(PESGM), Boston, MA, USA, 2016:1-5.
- [15] MITSUKURI Y, HARA R, KITA H, et al. Voltage regulation in distribution system utilizing electric vehicles and communication[C]//PES T&D 2012, Orlando, FL, USA, 2012; 1–6.
- [16] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2):182–197.
- [17] VERMA S, PANT M, SNASEL V. A comprehensive review on NSGA-II for multi-objective combinatorial optimization problems[J]. IEEE Access, 2021, 9:57757–57791.
- [18] TAGHIZADEH S, HOSSAIN M J, LU J, et al. A unified multifunctional on-board EV charger for power-quality control in household networks[J]. Applied Energy, 2018, 215:186–201.
- [19] 赵彪,于庆广,王立雯,等.具有馈电功能的新型并网UPS系
 统及其分散逻辑控制策略[J].中国电机工程学报,2011,31
 (31):85-93.

ZHAO Biao, YU Qingguang, WANG Liwen, et al. Novel gridconnected UPS system with the electricity feedback function and its distributed logic control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31):85–93.

- [20] ZHOU C, QIAN K, ALLAN M, et al. Modeling of the cost of EV battery wear due to V2G application in power systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(4): 1041–1050.
- [21] VERMA A K, SINGH B, SHAHANI D T. Grid to vehicle and vehicle to grid energy transfer using single-phase bidirectional AC-DC converter and bidirectional DC-DC converter[C]//2011 International Conference on Energy, Automation and Signal, Bhubaneswar, India, 2011: 1–5.
- [22] SORTOMME E, EL-SHARKAWI M A. Optimal charging strategies for unidirectional vehicle-to-grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1):131–138.
- [23] VARMA R K, KHADKIKAR V, SEETHAPATHY R. Nighttime application of PV solar farm as STATCOM to regulate grid voltage[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(4): 983–985.
- [24] 刘荣斌.广州市新能源电动汽车充电设施项目风险管理研究[D]. 衡阳:南华大学,2019.
 LIU Rongbin. Research on risk management of new energy elec-

tric vehicle charging facility project in Guangzhou[D]. Hengyang:University of South China, 2019.

[25] 高亚静,吕孟扩,梁海峰,等.基于离散吸引力模型的用电需求价格弹性矩阵[J].电力系统自动化,2014,38(13):103-107,144.

GAO Yajing, LÜ Mengkuo, LIANG Haifeng, et al. Power demand price elasticity matrix based on discrete attraction model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13):103– 107, 144.

[26] 高赐威,张亮.电动汽车充电对电网影响的综述[J].电网技 术,2011,35(2):127-131.

GAO Ciwei, ZHANG Liang. A survey of influence of electrics vehicle charging on power grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(2):127-131.

[27] VARMA R K, DAS B, AXENTE L. Optimal 24-hr utilization of a PV solar system as STATCOM(PV-STATCOM) in a distribution network[C]//2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, Detroit, MI, USA, 2011:1–8.

> 收稿日期:2023-02-03 修改稿日期:2023-03-18

(上接第38页)

Wireless Power Transfer (WoW), IEEE, 2017.

[9] 余江华,孙岩洲,张笑林,等.LCLC补偿型电场耦合式无
 线电能传输系统特性分析[J].制造业自动化,2018,40(9):
 151-155.

YU Jianghua, SUN Yanzhou, ZHANG Xiaolin, et al. Analysis of electric-field coupled wireless power transfer system with LCLC compensation network[J]. Manufacturing Automation, 2018, 40 (9): 151–155.

- [10] LI B, LU J H, LI W J, et al. Realization of CC and CV mode in IPT system based on the switching of doublesided LCC and LCC-S compensation network[C]//2016 International Conference on Industrial Informatics-Computing Technology, Intelligent Technology, Industrial Information Integration (ICIICII), 2016:364–367.
- [11] MA Z J. The effect of reliability on LCC and management information system design[C]//Proceedings of 2011 International Conference on Computer Science and Network Technology, China, 2011.
- [12] 朱国荣, 林鹏, 陆江华, 等. 无线能量传输系统双 LCC 谐振

补偿电路研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(5):104-109.

ZHU Guorong, LIN Peng, LU Jianghua, et al. Research on double LCC compensation circuit in inductive power transfer system[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2017, 45(5):104–109.

- [13] 王松岑,韩秀.磁耦合谐振式无线充电系统双边LCC补偿网络参数设计方法研究[J].电气技术,2019,20(6):12-16.
 WANG Songcen, HAN Xiu. Research on double LCC compensation network for magnetically coupled resonant wireless charging system[J]. Electrical Engineering, 2019,20(6):12-16.
- [14] 凌淳扬,刘芳,李昊,等.SiC MOSFET 在双向无线充电应用
 中的开关性能及效率优化研究[J].电气传动,2023,53(1):
 13-17,27.

LING Chunyang, LIU Fang, LI Hao, et al. Research on switching performance and efficiency optimization of SiC MOSFET in bidirectional wireless charging applications[J]. Electric Drive, 2023,53(1):13–17,27.

> 收稿日期:2024-04-17 修改稿日期:2024-05-15

考虑最大效率的风光制氢系统容量配置及功率调控

李亚军1,何山1,2,胡兵1,2,谢少华1

(1.新疆大学 电气工程学院,新疆 乌鲁木齐 830017;

2. 可再生能源发电与并网控制教育部工程研究中心,新疆乌鲁木齐 830017)

摘要:为解决新能源电解水制氢微电网系统中投资成本高、电解槽运行效率低、功率输入波动大等问题, 以微电网设备安装成本以及由负荷缺氢率和弃电率组成的系统综合优化指标为目标函数,提出风光制氢容量 配置方案,并根据电解槽效率特性曲线制定最大制氢效率的功率调控方法。根据风光发电功率波动情况选择 蓄电池为电解槽补充电能,编写基于精英非支配排序遗传算法求解系统中各设备的容量配置,利用多目标粒 子群优化算法进行电解槽最大效率功率调控。对比风光互补制氢方案,该容量配置模型可在安装成本接近的 条件下达到更低的综合优化指标,功率调控后系统平均电解槽输入功率波动率与电解槽效率分别下降了 58.37%与37.54%,显著改善了系统稳定性,提高了能源利用率。

关键词:微电网;最大效率;制氢;容量配置;功率调控 中图分类号:TK91 文献标识码:A DOI:10.19457/j.1001-2095.dqcd25048

Capacity Configuration and Power Regulation of Scenic Hydrogen Production System Considering Maximum Efficiency

LI Yajun¹, HE Shan^{1,2}, HU Bing^{1,2}, XIE Shaohua¹

 (1.School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, Xinjiang, China;
 2.Engineering Research Center of Renewable Energy Generation and Grid-connected Control Ministry of Education, Urumqi 830017, Xinjiang, China)

Abstract: Aiming at the problems of high investment cost, low efficiency of electrolyzer operation and high fluctuation of power input in the new energy electrolytic water to hydrogen microgrid system, the scenery hydrogen production capacity configuration scheme with the installation cost of microgrid equipment and the comprehensive optimization index of the system consisting of load hydrogen deficiency rate and power abandonment rate as the objective function and the power regulation method for achieving maximum hydrogen production efficiency based on the characteristic curve of electrolyzer efficiency was proposed. The battery was selected to supplement the electrolyzer according to the fluctuation of the power of the scenery generation, and the elitist non-dominated sorting genetic algorithm(NSGA-II) was written to solve the capacity configuration of each device in the system, and the multi-objective particle swarm optimization(MOPSO) was used to perform the maximum efficiency power regulation of the electrolyzer. In comparison to the scenery complementary hydrogen generation scheme, the capacity configuration model achieved a lower overall optimization index with a similar installation cost. After power regulation, the average electrolyzer input power fluctuation rate and electrolyzer efficiency decreased by 58.37% and 37.54%, respectively, which significantly improved the system stability and energy utilization.

Key words: microgrid; maximum efficiency; hydrogen production; capacity configuration; power regulation

随着经济迅速发展,能源危机问题日渐受到动资源可持续发展的必然要求,也是实现"双碳" 重视,大力发展风电、光电等可再生能源成为推目标的重要举措^[1]。由于风、光发电的装机容量

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB1506902);国家自然科学基金(52266018);新疆维吾尔自治区重点研发项目 (2022B01003-3);新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题(2022D04029) 作者简介:李亚军(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为可再生能源发电与并网技术研究,Email:564243238@qq.com

通讯作者:何山(1974—),男,博士,教授,主要研究方向为可再生能源发电与并网技术研究,Email:2513041660@qq.com

不断增加,风电、光电消纳成为一个重要研究课题^[2]。基于现阶段可再生能源制氢技术的发展与 突破,风电、光电等清洁电力转化为高质量的氢 气为提升可再生能源发电的稳定性与高效性提 供了有效解决途径^[3-4]。

近年来,国内外对风、光发电制氢系统的容 量配置和功率调控已有一些研究。文献[5]提出 以蓄电池作为储能方式,为系统运行过渡期短暂 供电;文献[6]提出以系统缺电率和供电波动率为 目标函数的容量配置模型,提高了系统的稳定 性;文献[7]提出了目标函数为含氢储能的风光互 补容量优化模型,综合考虑了系统的经济性和稳 定性;文献[8]提出了一种考虑电制氢系统的电热 综合能源系统两阶段随机调度模型,可提高系统 运行的灵活性,促进风电消纳;文献[9]以发电成 本作为单目标函数,使用基于相似度权重动态调 整的粒子群算法对并网下微网冬季典型日进行 优化调度;文献[10]以最小化系统年运行费用为 目标,研究柔性氢需求在不同光伏消纳水平下对 区域综合能源系统优化运行的影响;文献[11]建 立基于随机机会约束规划模型的冷热电联供微 电网能量优化调度模型,优化系统中光伏阵列、 电解槽等设备容量配置;文献[12-13]建立了考虑 电氢耦合的混合储能孤岛微电网的微源容量优 化配置模型,优化系统中光伏阵列、电解槽等设 备容量配置;文献[14]建立以微电网投资成本和 可再生能源利用率综合最优的多目标优化配置模 型,提高了风力机和光伏出力与负荷的匹配程度。

上述研究中多以经济成本或系统运行稳定 性为优化目标,未计及系统运行中电解槽效率及 输入功率波动性。本文在以上研究的基础上,提 出考虑系统安装成本及系统功率波动性的风光 制氢系统容量配置优化方法与功率调控方法,采 用基于精英非支配排序遗传算法(elitist non-dominated sorting genetic algorithm, NSGA-II), 以系统 设备年均成本以及由负荷缺氢率(hydrogen deficiency rate, HDR)和电损率(power loss rate, PLR) 组成的系统综合优化指标为目标函数计算系统 各部分容量,利用多目标粒子群优化(multiobjective particle swarm optimization, MOPSO)算法进行 电解槽最大效率功率调控,可综合评估微电网对 负荷供电的可靠性、新能源的利用率以及电解槽 制氢效率,改善系统的经济性与实用性。最后经 算例验证,分析了此方案在平衡设备投入的年均 成本、系统缺电率、电解槽效率及输入功率波动 性等方面的有效性。

1 电网系统结构及数学模型

1.1 系统结构

微电网系统中的发电设备主要包括光伏阵 列及风力发电机,储能设备为蓄电池,制氢设备 为碱性电解槽。其结构如图1所示。首先根据氢 需求及风光发电的总功率规划系统容量方案,而 后功率调控模型设计系统的运行方式。风能和 太阳能在时间和地域上有互补优势,能有效平抑 风光互补发电系统中风电和光伏出力波动,蓄电 池可为电解槽补充供电,保证电解槽制氢最大效 率、降低输入功率波动。



1.2 数学模型

1.2.1 光伏发电模型

光伏阵列的输出功率与太阳辐照强度、环境 温度及光伏变换器的效率有关^[15]。光伏发电数学 模型可表示为

$$P_{\rm pv} = P_{\rm pvN} \cdot f_{\rm pv} \cdot \alpha(t) \cdot G_{\rm t} / G_{\rm ref}$$
(1)

式中: $P_{\mu\nu}$ 为单位光伏阵列实际输出功率; $P_{\mu\nu}$ 为单 位光伏阵列的额定输出功率; $f_{\mu\nu}$ 为光伏变换器的 效率,取90%; G_t 为太阳辐照强度; G_{ref} 为标准参考 辐照强度; $\alpha(t)$ 为温度对光伏功率的影响系数。 $\alpha(t)$ 可表示为

$$\alpha(t) = 1 + \mu [T(t) - 25]$$
 (2)

其中 $T(t) = T_a(t) + G_t/800 \cdot (T_N - 20)$ (3) 式中: μ 为温度系数,取0.0048;T(t)为当前工作 温度; $T_a(t)$ 为当前环境温度; T_N 为标准工作温度 25°C。

1.2.2 风力发电模型

风力发电机组将风轮捕获的风能转化为电

能输出,其输出功率Pwr与实时风速、风轮面积、 空气密度等参数相关,如下式所示:

$$P_{\rm wT} = 1/2C_{\rm P}\rho Sv^3 \tag{4}$$

(6)

)

式中:v为实时风速;p为空气密度;S为风轮扫过的面积;C_p为风力发电的功率因子。

Cp可表示为

$$C_{\rm P} = 0.5176 \times (116/\lambda - 0.4\beta - 5) \times e^{-21/\lambda} + 0.0068\lambda$$
 (5)

其中
$$\frac{1}{1} = \frac{1}{1 + 0.082} - \frac{0.035}{0.035}$$

 $\lambda^{-} \lambda + 0.08\beta \beta^{3} + 1$ 式中: λ,β 分别为叶尖速比与桨距角。

1.2.3 电解槽-蓄电池模型

电解槽工作数学模型可表示为
$$\begin{cases} Q_{\rm el}(t) = P_{\rm H}(t) \cdot \eta(t) \\ \eta(t) = 0.965 e^{[0.09/l(t) - 75.5/l^{2}(t)]} \cdot \frac{U_{\rm tn}}{U_{\rm el}(t)} \end{cases}$$
(7

式中: $Q_{\rm el}(t)$ 为电解槽产氢量; $P_{\rm H}(t)$ 为电解槽输入 功率; $\eta(t)$ 为电解槽效率;I(t)为电解电流; $U_{\rm m}$ 为 热中性电压,即理论分解电压1.23 V; $U_{\rm el}(t)$ 为实 际电解电压。

电解槽效率特性曲线如图2所示。由电解槽 模型可知,电解槽效率受到电解电流I与实际电 解电压Uel影响,且随I增大而增大,随Uel减小而 减小^{116]}。由文献[17]可知,当电解槽输入功率达 到额定功率的31%时,电解效率为83.42%,此时 电解槽效率较高,但输入电压太小,产氢速率较 低;当输入功率大于电解槽额定功率的50%时, 电解槽效率略有降低,但产氢速度有所提升;当 输入功率为电解槽额定功率时,电解槽效率为 71%,此时电解槽产氢速度最大,制氢收益最高。 综合考虑电解槽效率、产氢速率以及电能损失, 电解槽的最优工作区间为电解槽额定功率P_N的 50%~100%。



Fig.2 Electrolyzer efficiency characteristic curve

蓄电池是系统中的储能设备,其数学模型可

$$E(t) = (1 - \tau)E(t - 1) - \Delta E(t)$$

$$(8)$$

$$(P(t)m \Delta t - P(t) < 0$$

$$\Delta E(t) = \begin{cases} P_{\rm b}(t) \eta_{\rm c} \Delta t & P_{\rm b}(t) < 0 \\ P_{\rm b}(t) / \eta_{\rm d} \Delta t & P_{\rm b}(t) \ge 0 \end{cases}$$
(9)

式中:E(t),E(t-1)分别为第t时刻与t-1时刻 蓄电池电量; $\Delta E(t)$ 为蓄电池第t个时段的电量变 化; τ 为蓄电池的放电率; $P_{b}(t)$ 为蓄电池充放电功 率,正值表示放电,负值表示充电; η_{c} , η_{d} 分别为电 池的充电效率和放电效率; Δt 为时间间隔。

2 容量配置与功率调控模型

2.1 容量配置目标函数与决策变量

2.1.1 经济性指标函数

经济性指标函数从系统的主要设备整个生命周期出发,计算其年均经济成本。不仅包含设备单位容量的安装成本,还包含设备单位容量的 折旧率、设备单位容量运行时的维护成本。经济性目标函数如下式所示:

 $E_{\text{total}} = N_{\text{pv}} \cdot E_{\text{pv}} + N_{\text{wt}} \cdot E_{\text{wt}} + N_{\text{H}} \cdot E_{\text{H}} + N_{\text{b}} \cdot E_{\text{b}}$ (10) 式中: E_{total} 为系统设备年均经济成本; $N_{\text{pv}}, N_{\text{wt}}, N_{\text{H}}$, N_{b} 分别为光伏阵列、风力发电、电解槽、储氢罐和 蓄电池的安装容量,即系统容量优化的决策变 量; $E_{\text{pv}}, E_{\text{wt}}, E_{\text{H}}, E_{\text{b}}$ 分别为对应设备单位容量的年 均安装成本。

 $E_{\text{pv}}, E_{\text{wt}}, E_{\text{H}}, E_{\text{b}}$ 分别可用下式表示:

$$E_{\rm pv} = \frac{P_{\rm pvN}C_{\rm pv}}{N} + \frac{\left[(1+r)^{\rm N}-1\right]C_{\rm pv_{\rm M}}P_{\rm pvN}}{r(1+r)} \quad (11)$$

$$E_{\rm wt} = \frac{P_{\rm wtN}C_{\rm wt}}{N} + \frac{\left[(1+r)^{\rm V}-1\right]C_{\rm wt,M}P_{\rm wtN}}{r(1+r)} \quad (12)$$

$$E_{\rm H} = \frac{P_{\rm HN}C_{\rm H}}{N} + \frac{\left[(1+r)^{\rm N} - 1\right]C_{\rm H_M}P_{\rm HN}}{r(1+r)} \qquad (13)$$

$$E_{\rm b} = \frac{P_{\rm bN}C_{\rm b}}{N} + \frac{\left[(1+r\,)^{N} - 1\right]C_{\rm b_M}P_{\rm bN}}{r(1+r\,)} \qquad (14)$$

式中:P_{wtN},P_{HN},P_{bN}分别为风力发电机、电解槽和 蓄电池单位容量的额定功率;C_{pv},C_{wt},C_H,C_b分别 为对应设备单位容量的年均安装成本;C_{pv_M},C_{wt_M}, C_{H_M},C_{b_M}分别为对应设备单位容量的年均运维成 本;N为设备的使用年限,通常为20a,具体使用 年限根据设备不同略有差异;r为设备的折旧率, 通常取6%。

2.1.2 系统综合误差指标函数

系统综合优化指标由两部分组成,分别为代 表系统供电可靠性的系统缺氢率(HDR)及反映 系统新能源利用率的系统电损率(PLR)。HDR表 示为下式:

$$\begin{cases} HDR = \frac{Q_{\rm d}(t)}{Q_{\rm load}(t)} \\ Q_{\rm d}(t) = Q_{\rm load}(t) - Q_{\rm el}(t) \end{cases}$$
(15)

式中: $Q_{d}(t)$ 为系统缺氢量; $Q_{load}(t)$ 为系统氢负荷。

*PLR*可表示系统运行过程中除电力电子设备 消耗的电能损失,其表示为下式:

$$\begin{cases} PLR = \frac{P_{\rm re}(t)}{P_{\rm spv}(t) + P_{\rm swt}(t)} \\ P_{\rm re}(t) = P_{\rm spv}(t) + P_{\rm swt}(t) - P_{\rm H}(t) \end{cases}$$
(16)

式中: $P_{re}(t)$ 为风光发电满足氢负荷后的多余功率; $P_{spv}(t)$, $P_{syt}(t)$ 分别为系统风力、光伏发电总量。

HDR可反映系统供电可靠性,PLR可反映系统风能与光能利用率,二者权重可根据系统建设要求适当调整,本文讨论的微电网系统对系统稳定性及新能源利用率并无侧重,故赋予 HDR 和 PLR 相同的权重,转换成衡量系统平衡的系统综合优化指标(comprehensive index,CI),表示为

 $CI = HDR + PLR \tag{17}$

2.2 功率调控目标函数及决策变量

以电解槽能量利用率f₁最大与输入电解槽能量波动率f₂最小作为目标函数,如下式所示,决策变量为采样点各设备功率。

$$\begin{cases} f_{1} = \frac{\sum_{t=1}^{\max} \eta(t) \cdot P_{H}(t)}{\sum_{t=1}^{\max} P_{spv}(t) + P_{swt}(t)} \\ f_{2} = \frac{1}{\max} \cdot \sum_{t=1}^{\max} \frac{P_{H}(t+1) - P_{H}(t)}{P_{H}(t)} \end{cases}$$
(18)

式中:max为系统运行周期最大采样点数。

2.3 约束条件

各装置的功率平衡约束、功率边界约束、容 量边界约束表示为下3式。

1)功率平衡约束:

$$\begin{cases} P_{spv}(t) + P_{swt}(t) = P_{H}(t) + P_{b}(t) + \\ P_{re}(t) & P_{sp} > P_{load} \\ P_{load}(t) = P_{spv}(t) + P_{swt}(t) + P_{b}(t) & \end{cases}$$
(19)

式中: P_{sp} 为风光发电总功率; P_{load} 为氢负荷所需 电量。

2) 电解槽与蓄电池功率边界约束:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\rm H}(t) \leq N_{\rm H} \cdot P_{\rm HN} \\ 0 \leq P_{\rm b}(t) \leq N_{\rm b} \cdot P_{\rm b} \end{cases}$$
(20)

3)各装置容量约束:

$$\begin{cases} 0 < N_{\rm pv} \leq N_{\rm pv,max} & N_{\rm pv,max} \in \mathbf{N} \\ 0 < N_{\rm wt} \leq N_{\rm wt,max} & N_{\rm wt,max} \in \mathbf{N} \\ 0 < N_{\rm H} \leq N_{\rm H,max} & N_{\rm H,max} \in \mathbf{N} \\ 0 < N_{\rm b} \leq N_{\rm b,max} & N_{\rm b,max} \in \mathbf{N} \end{cases}$$
(21)

式中:N_{pv.max},N_{wt.max},N_{H.max},N_{b.max}分别为光伏阵列、风 力发电机、电解槽、蓄电池能够单独满足负荷时 的数量;N为自然数集。

3 系统控制流程及模型求解方法

3.1 系统控制流程

系统控制策略决定各部分的出力顺序,反映 各部分的运行状况,对容量优化结果起到决定性 作用,也与之后的功率调控相关,系统控制流程 如图3所示。图3中,*P*_s为风光发电总功率,*P*_s,为 蓄电池组最大功率。



图 3 系统控制流程图 Fig.3 System control flow chart

当采样点风光发电功率大于氢负荷需求功 率时,计算多余电功率并判断蓄电池状态,若储 满则计算系统弃电量,未储满则执行A方案;当 采样点风光发电功率小于氢负荷需求功率时,判 断蓄电池状态,若蓄电不足,则计算系统缺氢率, 若充足则继续判断缺额功率是否大于蓄电池总 功率,若大于则执行B方案,小于则执行C方案。

为7.805 m/s,年平均辐照强度为189.566 W/m²。

A~C方案具体如下:

A方案:满足负荷要求后,多余功率为蓄电池 充电,若仍有余电则放弃并计算系统弃电量;

B方案:系统蓄电池最大功率启动仍不能满 足氢负荷,重新计算系统缺氢并计算缺氢率;

C方案:启动蓄电池可以满足系统氢负荷,此 时系统无缺氢。

3.2 模型求解

根据负荷用电量,以光伏阵列、风力发电机、 电解槽、蓄电池等设备的容量作为目标变量的容 量优化,是一个多目标、多变量的非线性问题^[16], NSGA-II不受问题的具体领域和场景影响,有很 强的鲁棒性,能很好地解决相关领域复杂的多目 标优化问题^[17]。本文采取NSGA-II进行对系统容 量求解,使用MOPSO算法对系统进行功率调控。 具体求解流程如图4所示。



Fig.4 System solving flow chart

首先导入所需风速、辐照强度、氢负荷等数据,通过风光发电、电解槽等数学模型计算,使用 NSGA-II计算系统容量;然后将系统容量等数据 导入 MOPSO 算法,配置算法参数如下:种群大 小、最大迭代次数、交叉概率、变异概率等,最后 结合导入的数据利用算法计算各目标函数的适 应度值,以及各设备的输入、输出功率结果。

4 算例分析

4.1 仿真场景分析

选取新疆某风电场和光电厂实测数据作为 参考数据,数据采样间隔为1h,该地年平均风速



选取全年风光气象数据4个季度中各一个典型日,结合风光发电数学模型,以额定功率为50 kW的风力发电机与光伏阵列模拟典型日风光出 力如图7所示。根据文献[18]选取城市居民天然 气、氢燃料、天然气电池汽车的用量并加以处理、 换算作为系统负荷,将城市氢负荷分为春冬负荷 与夏秋负荷。不同时间段氢负荷有较大的差异, 全年用氢量上呈现年初及年尾(春冬)用量大,年

中(夏秋)用量小,其主要原因受气温影响;由于







Fig.8 Hydrogen loading curve

设备成本包括购买费用、安装设备所耗费的 建设成本、设备运行过程中耗费的维护成本以及 设备更换折旧率。每kW容量的具体数据如表1 所示^[19-20]。

表1 各设备单位容量成本及其参数

Tab.1 Unit capacity cost of each equipment and its parameters

项目类型	安装成本/	运维成本/	+C1日支100
	(元・kW ⁻¹)	(元・W-1)	折旧举/%
光伏	3 500	40	6
风电	2 000	35	6
电解槽	4 000	160	6
蓄电池	2 700	130	6

4.2 容量优化及功率调控结果

对 NSGA-II 的初始参数设置如下:种群规模 为 100,迭代次数为 200,交叉概率为 0.8,变异概 率为 0.2。得到最优容量规划最优解集,本文容 量优化模型包含 3 个元素,分别为年均经济成本 *E*_{total}、缺氢率 *HDR*、电损率 *PLR*,故其最优解集在 一个 3 维平面中,容量优化解集如图 9 所示,典型 日运行周期各部分出力结果如图 10 所示。





由图9可知,容量优化模型中3个元素互相 矛盾,不可能同时达到最优,在不考虑其中两种



元素的情况下,另外一种元素可以找到最优解。 按照折中原则选择相对最优解进行仿真验证分 别为:年均成本2127500元、弃电率12.39%、缺 氢率2.61%;各设备的容量(决策变量)分别为:光 伏电池1450kW、风力发电机4550kW、蓄电池 3250kW、电解槽4800kW。

由图 10 可知,运行周期内风力发电总量为 263 820.03 kW·h、光伏发电总量为37 306.47 kW·h、 蓄电池放电量为 56 241.79 kW·h、蓄电池耗电量 为 68 135.83 kW·h、电解槽耗电量为 241 847.72 kW·h。由于风力发电机安装成本较低,为系统 的主要供电设备,光伏电池与蓄电池容量相对较 小,可在风机出力不足时为系统补充供电。

4.3 电解槽输入功率稳定性分析

根据容量配置优化结果,结合各个季度典型 日气象数据所得系统供电波动率如图11所示。 由图7可知光伏发电随太阳辐照强度周期变化, 而风力发电白天出力较低,夜晚出力较高,二者 具有良好的互补能力。

风力发电平均功率波动为19.89%,最高波动 率为121.58%;光伏发电平均功率波动为16.11%, 最高波动率为118.34%;风光互补发电平均功率 波动为22.24%,最高波动率为98.47%;蓄电池补 充发电平均功率波动为15.64%,最高波动率为 79.43%。风光互补发电可有效降低系统发电波 动率,采用蓄电池作为储能装置并经算法对功率 调控优化之后可进一步降低系统供电波动,减小 由于供电波动造成的电解槽损伤。

带蓄电池储能的风光互补制氢系统功率调 控经优化后,有效改善了系统的动态运行稳定 性,并可大幅度提升电解槽的制氢效率、增加系



统制氢收益,在全年4个典型日运行周期中,带蓄 电池储能与风光互补直接制氢系统电解槽效率 与输入功率波动率对比如图12所示,蓄电池电量 与充放电功率如图13所示。





Fig.12 Electrolyzer efficiency versus input power fluctuation rate 风光互补与蓄电池储能系统电解槽输入功

率平均波动率分别为57.12%,26.37%,峰值分别 为118.51%,86.24%,两系统电解槽平均效率分别 为45.36%,62.39%。由前文可知,电解槽输入功 率在额定功率*P*_N的50%~100%之间为最优工作 区间,当输入功率低于50%时,带蓄电池储能的 制氢系统可根据蓄电池状态判断是否为电解槽 补充电能。经蓄电池为电解补充电能后较前者 蓄电池储能系统电解槽平均输入功率波动率下 降了53.87%,电解槽制氢效率提升了37.54%,提 高了系统的能源利用率和稳定性。



5 结论

可再生能源制氢是实现能源转型与高效开 发的重要途经,为减少系统安装成本、提高电解 水制氢能源利用率,降低风光发电功率的波动 性,根据电解水制氢效率特性,提出了带蓄电池储 能的容量规划方案与功率调控方法,结论如下:

1)采用NSGA-II,对容量配置模型进行求解, 最终求得84个相对最优解,其中绝大部分系统缺 氢率可在5%以下,系统弃电率在20%以下,年均 安装成本在2000000元以下;

2)针对工作中电解槽输入功率不稳定导致 制氢效率低的问题,基于 MOPSO 算法的功率调 控方法可降低电解槽输入波动率,提高电解槽制 氢效率,相对优化前的风光互补制氢系统电解槽 平均输入功率波动率下降了53.87%,电解槽制氢 效率提升了37.54%,有效提升了系统的稳定性与 能源利用率。

本文只考虑风光发电、蓄电池、制氢、储氢成 本,并未计算其他电力电子设备的运行成本,未 来可进一步调查加以完善。

参考文献

[1] 时璟丽,高虎,王红芳,等.风电制氢经济性分析[J].中国能源,2015,37(2):11-14.

SHI Jingli, GAO Hu, WANG Hongfang, et al. Economic analysis of wind turbine hydrogen production[J]. Energy of China, 2015,37(2):11-14.

 [2] 周天沛,孙伟.风光互补发电系统混合储能单元的容量优化 设计[J].太阳能学报,2015,36(3):756-762.
 ZHOU Tianpei,SUN Wei. Capacity optimization of hybrid energy storageunits in wind/solar generation system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2015,36(3):756-762.

- [3] NGUYEN T H T, NAKAYAMA T, ISHIDA M. Optimal capacity design of battery and hydrogen system for the DC grid with photovoltaic power generation based on the rapid estimation of grid dependency[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2017, 89(Jul.):27–39.
- [4] YANG Z, HUI F Z, YING W, el al. Optimized scheduling model for isolated microgrid of wind-photovoltaic-thermal-energy storage system with demand response[J]. Congress on Evolutionary Computation, 2019, 70: 1170-1175.
- [5] 叶俊.促进风电消纳的电热综合能源系统优化调度研究
 [D].武汉:武汉大学,2018:24-26.
 YE Jun. Research on optimal scheduling of integrated electricity and heat energy system with promoting wind power integration[D]. Wuhan:Wuhan University,2018:24-26.
 [6] 芦思为,黄彦全,张培,等.改进粒子群算法的微网经济调度
- [J]. 电测与仪表,2017,54(22):23-29.
 LU Siwei, HUANG Yanquan, ZHANG Pei, el al. Economic dispatch of micro-grid based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017,54(22):23-29.
- [7] 韩华春,李强,袁晓冬.考虑柔性氢需求的区域综合能源系统 优化调度方法[J].电力科学与技术学报,2022,37(3):12-18.
 HAN Huachun, LI Qiang, YUAN Xiaodong. Optimal dispatch of regional integrated energy systems considering flexible hydrogen demand[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(3):12-18.
- [8] 杨里,丁智华,林纲,等. 冷热电联供微电网的网络损耗优化 调度策略[J]. 电测与仪表,2020,57(7):74-81.
 YANG Li, DING Zhihua, LIN Gang, et al. Optimization of network loss scheduling strategy for CCHP micro-grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2020,57(7):74-81.
- [9] 贾成真,王灵梅,孟恩隆,等.风光氢耦合发电系统的容量优 化配置及日前优化调度[J].中国电力,2020,53(10):80-87.
 JIA Chengzhen, WANG Lingmei, MENG Enlong, et al. Optimal capacity configuration and day-Ahead scheduling of wind-solarhydrogen coupled power genera-tion system[J]. Electric Power, 2020,53(10):80-87.
- [10] NI Meng, LEUNG M K H, LEUNG D Y C. Technological development of hydrogen production by solid oxide electrolyzer cell
 [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33 (9): 2337–2354.
- [11] DOENITZ W, SCHMIDBERGER R, STEINHEIL E. Hydrogen production by high temperature electrolysis of water vapour[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1980, 5(1):55–63.
- [12] 李奇,赵淑丹,蒲雨辰,等.考虑电氢耦合的混合储能微电网容量配置优化[J].电工技术学报,2021,36(3):486-495.
 LI Qi, ZHAO Shudan, PU Yuchen, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage microgrid considering electricity-hydrogen coupling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2021,36(3):486-495.
- [13] 邓智宏,江岳文.考虑制氢效率特性的风氢系统容量优化[J].可再生能源,2020,38(2):259-266.

DENG Zhihong, JIANG Yuewen. Capacity optimization of wind hydrogen system considering hydrogen production efficiency[J]. Renewable Energy, 2020, 38(2):259–266.

- [14] 梁开勋, 蔺红. 计及设备特性的风氢系统混合储能容量优化
 [J]. 现代电子技术, 2021, 44(21): 180-186.
 LIANG Kaixun, LIN Hong. Wind-hydrogen system's hybrid energy storage capacity optimization considering equipment characteristics[J]. Modern Electronics Technique, 2021, 44 (21): 180-186.
- [15] 魏繁荣,随权,林湘宁,等.考虑制氢设备效率特性的煤风氢 能源网调度优化策略[J].中国电机工程学报,2018,38(5): 1428-1439.

WEI Fanrong, SUI Quan, LIN Xiangning, el al. Energy control scheduling optimization strategy for coal-wind-hydrogen energy grid under consideration of the efficiency features of hydrogen production equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38 (5):1428–1439.

- [16] 李海珍. NSGA2遗传算法改进研究及其在微电网配置中的应用[D]. 兰州:兰州理工大学,2017:13-14.
 LI Haizhen. Research on improvement of NSGA2 genetic algorithm and its application in micro-grid configuration[D]. Lanzhou:Lanzhou University of Technology,2017:13-14.
- [17] 李咸善,方子健,李飞,等.含多微电网租赁共享储能的配电
 网博弈优化调度[J].中国电机工程学报,2022,42(18):
 6611-6625.

LI Xianshan, FANG Zijian, LI Fei, el al. Game-based optimal dispatching strategy for distribution network with multiple microgrids leasing shared energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18);6611–6625.

[18] 黄张浩,张亚超,郑峰,等.基于不同利益主体协调优化的主动配电网日前-实时能量管理方法[J].电网技术,2021,45
 (6):2299-2308.

HUANG Z H, ZHANG Y C, ZHENG F, et al. Day-ahead and real-time energy management for active distribution network based on coordinated optimization of different stakeholders[J]. Power System Technology, 2021, 45(6):2299–2308.

[19] 刘雨佳,樊艳芳,郝俊伟,等.基于碱性电解槽宽功率适应模型的风光氢热虚拟电厂容量配置与调度优化[J].电力系统保护与控制,2022,50(10):48-60.

LIU Yujia, FAN Yanfang, HAO Junwei, el al. Capacity configuration and optimal scheduling of a wind-photovoltaic-hydrogenthermal virtual power plant based on a wide range power adaptation strategy for an alkaline electrolyzer[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(10):48–60.

[20] 张帆,王博文,樊林浩,等.光伏发电制氢储能系统仿真及性能分析研究[J]. 工程热物理学报,2022,43(10):2653-2658. ZHANG Fan, WANG Bowen, FAN Linhao, et al. Simulation and performance analysis of photovoltaic power generation and hydrogen storage system[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2022,43(10):2653-2658.

混合储能系统的鲁棒配置与优化运行策略

宋朋飞¹,汪马翔²,杨桂兴¹,李吉晨²,亢朋朋¹,温胜寒²

(1.国网新疆电力有限公司,新疆乌鲁木齐 830063;

2. 国网电力科学研究院有限公司, 江苏南京 211106)

摘要:为提升新能源场站配套储能设施的经济性和灵活性,以及提高大规模新能源场站向大用户直供电的稳定性和并网友好性,提出了发电侧混合储能的两阶段鲁棒配置与优化运行策略。第一阶段基于需求功率 信号的经验模态和希尔伯特-黄变换分解,考虑储能投资成本和新能源场站供能与并网需求,构建鲁棒配置模型。第二阶段在第一阶段优化配置方案的基础上,以降低净负荷波动为目标构建优化运行模型,满足场站供 能和并网需求。通过某省实际风电场和负荷数据的算例分析,验证了所提模型的竞争性和有效性,为新能源 场站与储能的协同发展提供了技术支持和决策参考。

关键词:新能源场站;储能设施;鲁棒配置;优化运行;并网友好性 中图分类号:TM28 文献标识码:A DOI:10.19457/j.1001-2095.dqcd25251

Robust Configuration and Optimized Operation Strategy of Hybrid Energy Storage System

SONG Pengfei¹, WANG Maxiang², YANG Guixing¹, LI Jichen², KANG Pengpeng¹, WEN Shenghan²

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830063, Xinjiang, China;

2. State Grid Electric Power Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211106, Jiangsu, China)

Abstract: To enhance the economic and operational flexibility of accompanying energy storage facilities in new energy power stations, as well as to improve the stability of supplying electricity directly to large users and the grid-friendliness of large-scale new energy power stations, a two-stage robust configuration and optimized operation strategy for hybrid energy storage on the generation side was proposed. In the first stage, based on the empirical mode decomposition and Hilbert–Huang transform of demand power signals, considering the investment cost of energy storage and the supply-demand requirements of new energy power stations and grid integration, a robust configuration model for various types of energy storage units in the hybrid system was constructed. In the second stage, with the first-stage optimized configuration as a constraint, an optimization model for the operation of hybrid energy storage was developed with the objective of reducing net load fluctuations while meeting the power supply requirements of the power station and grid integration. The effectiveness and competitiveness of the proposed models and strategies were demonstrated through case studies using actual wind power and load data from a certain province, providing technical support and decision-making references for the coordinated development of new energy power stations and energy storage.

Key words: new energy power stations; energy storage facilities; robust configuration; optimized operation; grid-friendliness

在双碳目标的驱动下,新能源已逐步成为我 国电力系统常用电源,但新能源发电受一次能源 供给影响,难以满足电网调峰、调频需求,故需要 配备储能以抑制新能源不确定性对电网安全稳 定运行的影响。为了稳步推进能源转型,实现新 能源友好并网,"新能源+储能"集群接入将成为 新型电力系统建设的标准配置^[1]。在此情况下, 新能源与储能的经济配比及其协同运行方式成 为新型电力系统运行规划的重要问题。文献[2] 利用跟踪计划允许误差带法以储能补偿新能源

基金项目:国家电网公司总部科技项目(5419-202040493A-0-0-00)

作者简介:宋朋飞(1987—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力系统运行与控制,Email:598802534@qq.com

通讯作者:汪马翔(1981—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为新能源并网控制技术,Email:cswp_stcl@163.com

功率预测误差为依据进行储能配置,以改善新能 源发电的消纳问题。文献[3]利用鲁棒优化法以 平抑新能源场站的随机性波动为目标构建配置 模型,以提升并网电能质量。文献[4]利用截断正 态分布法模拟新能源场站实际出力特征,建立了 "低储高发"套利模型,以增加场站运行效益。文 献[5]利用非参数核密度估计法配置风-储一体化 发电系统中配套储能的容量,使一体化系统具备 类似传统机组的惯性支撑能力。文献[6]提出简 化的系统频率响应模型的储能容量优化配置方 法,使储能具有提升电网调节与支撑能力。上述 研究虽从协同新能源场站出力计划到联合火电、 风电、光伏等多种能源参与调峰、调频,均体现出 配套储能发挥着显著作用,但随着未来电网形态 的不断发展、大规模新能源广泛接入、电力市场 不断开放,工业大用户向大规模新能源场站直购 电的模式应运而生,多元电力市场蓬勃发展,主 体竞争更加明确^[7]。在此情况下,为保障电力系 统安全稳定运行,配套储能需满足多主体的调节 需求¹⁸。因此, 亟需厘清不同利益主体间调节需 求的动态相依关系,研究满足不同响应特征的调 节需求下新能源场站配套储能的经济配置方案 与协同运行策略。

混合储能兼顾高功率与高能量型储能的优 势,即可利用高能量型储能削峰填谷提高"新能 源+储能"一体化系统的经济性,又可利用高功率 型储能平抑新能源发电的随机性¹⁹¹,是满足具有 不同响应特性调节需求的有效技术手段之一。 国内外众多学者对混合储能的应用展开了研究, 文献[10-11]分别利用混合储能平抑光伏与冲击 性负荷接入电网的随机性功率波动引起的扰动: 文献[12]将混合储能作为有轨电车的驱动电源, 以实现电车的能耗最小,从而推动交通电气化进 程。在混合储能能量管理与功率分配方面,文献 [13]提出分组协调控制策略,将各类型储能单元 进行模块化管理;文献[14-16]分别采用离散傅里 叶变换、小波分解、经验模态法对各类型储能单 元进行功率信号分配。上述研究有效地利用混 合储能响应特征优势满足不同应用需求,并利用 提取瞬时功率进行更加科学的功率分配。但较 多局限于规划层面,对于短时协同运行较少涉 及,且满足需求较为单一,难以应对未来电网形 态演变下对储能多重调节需求带来的挑战。

基于上述分析,为增加大规模新能源场站的

运营收益、提升向工业用户直供电的稳定性、促 进新能源发电并网的友好性,本文提出了一种发 电侧混合储能两阶段鲁棒配置与优化运行策略, 以满足不同新能源场站对储能的需求。主要贡 献如下:

1)提出发电侧混合储能系统的基本结构,与 传统新能源场站储能结构单一功能相比可满足 向工业大用户直供电的稳定性需求、新能源的高 效利用需求,又可提高大规模新能源的友好并网 能力;

2)提出利用经验模态与希尔伯特-黄变换法 对需求功率信号进行分解,与现有方法相比可利 用提取瞬时功率对不同类型的储能单元进行更 加科学的功率分配;

3)提出混合尺度两阶段鲁棒配置与优化运 行模型,与传统两阶段配置模型相比适用于应对 多时间尺度调节需求的储能规划建模。

1 混合储能系统结构

本文针对大规模新能源场站出力的波动性 与随机性,通过利用能量型与功率型储能的运行 特征来构建由锂电池与超级电容组成的混合储 能系统,以提高新能源场站向大用户直供电的稳 定性与并网友好性。

发电侧混合储能系统由风电场和混合储能 组成的一体化发电系统以及具有直供电需求的 工业大用户构成,其系统结构如图1所示。其中 混合储能系统利用能量型储能——锂电池,平抑 大幅值、低频率波动的功率分量;利用功率型储 能——超级电容,平抑小幅值、高频率波动的功 率分量。具有如下需求关系:

1)大规模风电场承担向工业大用户直供电 的电负荷需求,场站向上级电网购电则作为应急 与备用;

 2)当风电场输出电能供大于求时,将部分过 剩电能存储在混合储能系统中,部分剩余电能出 售至上级电网以此获利;

3)当风电场输出电能供不应求时,混合储能 系统放电以满足直供电需求;

4)当一体化系统同电网进行电量交互时,利 用混合储能跟踪电量交互计划,平抑随机性风电 出力波动对电网引起的扰动。

综上,发电侧混合储能既满足了向工业大用 户直供电的稳定性需求,又促进了风电消纳实现



Fig.1 Structure of hybrid energy storage system for generation side

新能源的高效利用,此外也可应对由于风速随机 性带来的风电功率波动,从而提高大规模风电场 的友好并网能力。

2 混合储能备用惯量

为了提升出现大功率扰动情况下新型电力 系统的频率稳定性,本文利用储能的虚拟惯量、 快速功率支撑特性,为应对系统扰动留一定备用。

首先,锂电池的惯性时间常数可由下式计算:

$$H_{\mathrm{L},t} = \frac{E_{\mathrm{L},t}}{E_{\mathrm{R}}^{\mathrm{LC}} \cdot S_{\mathrm{0}}} C_{\mathrm{L}}^{\mathrm{max}} \tag{1}$$

式中: E_{Lt} 为锂电池t时段的剩余电量; E_{R}^{LC} 为混合 储能中锂电池的额定容量; S_{0} 为单位基准功率, $MV \cdot A$; C_{L}^{max} 为锂电池最大充放电倍率。

超级电容的惯性时间常数可由下式计算:

$$H_{\mathrm{S},t} = \frac{E_{\mathrm{S},t}}{E_{\mathrm{R}}^{\mathrm{SC}} \cdot S_{\mathrm{0}}} C_{\mathrm{S}}^{\mathrm{max}}$$
(2)

式中:*E*_s,为超级电容*t*时段的剩余电量;*E*^{sc}为超级电容的额定容量;*C*^{max}为超级电容最大充放电倍率,通过该值限制混合储能最大充放电功率。

系统暂态出现功率扰动情况下,混合储能暂 态支撑功率表达式如下:

$$\Delta P_{\mathrm{L},t} = -(2H_{\mathrm{L},t} \cdot \frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} + \frac{1}{\delta_{\mathrm{L}}} \cdot \Delta f) \cdot \frac{P_{\mathrm{L}}^{\mathrm{max}}}{f_{0}} \quad (3)$$

$$\Delta P_{\rm S,t} = -(2H_{\rm S,t} \cdot \frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} + \frac{1}{\delta_{\rm S}} \cdot \Delta f) \cdot \frac{P_{\rm S}^{\rm max}}{f_0} \qquad (4)$$

式中: $\Delta P_{L,i}, \Delta P_{S,i}$ 分别为锂电池和超级电容暂态支 撑功率; P_{L}^{max}, P_{S}^{max} 分别为锂电池和超级电容的额 定功率; δ_{L}, δ_{S} 分别为锂电池和超级电容的调差系 数;f为系统频率; Δf 为系统频率变化。

若一个100%新能源电力系统中仅有储能提 供系统惯量,其储能系统整体惯量可表征为

$$\left| -\frac{(\Delta P_{\mathrm{L},t} + \Delta P_{\mathrm{S},t} + \Delta P_{\mathrm{G},t})f_0}{2(E_{\mathrm{stor}} + E_{\mathrm{G}})} \right| = R_{\mathrm{Gstor}}^{\mathrm{LS}} \quad (5)$$

式中: f_0 为系统基准频率; ΔP_{G_t} 为系统大功率扰动下其他提供惯量的机组的响应功率; E_{stor} 为储能提供的旋转动能; E_c 为其他机组旋转动能; R_{Gasr}^{LS} 为系统频率变化率。

由式(5)可知,在系统出现扰动情况下,混合 储能系统应该储备的旋转动能为

 $E_{\text{stor},t} = H_{\text{L},t}^{\max} \cdot \max(P_{\text{L}}^{\max}, P_{\text{Lsoc},t}^{\max}) + H_{\text{S},t}^{\max} \cdot \max(P_{\text{S}}^{\max}, P_{\text{Soc},t}^{\max})$ (6)

在系统大功率扰动下,频率变化幅度关键取 决于系统有功备用,而储能系统的快速双向功率 特性决定了其适合预留一定容量为系统提供惯 量,因此,在储能配置优化层需考虑其惯量备用 容量。

3 混合储能功率分配策略

正常运行情况下,为了平抑风电功率波动, 本文利用经验模态与希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)法对需求功率信号进行分 解,实现混合储能对不同类型的储能单元的功率 分配。

采用经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)法可在无需其他先验信息的情况下, 把多分量特征的混合储能功率信号分解为多个 固有模态函数(intrinsic mode function, IMF)与一 个残余分量^[17]:

$$P_{t}^{\text{HES}} = \sum_{n=1}^{N_{\text{nor}}} F_{n,t} + \zeta_{t}$$
(7)

式中: P_t^{HES} 为在t时刻混合储能待分解的功率信号; N_{IMF} 为固有模态函数的总个数; $F_{n,t}$ 为在t时刻的第n个IMF; ζ_t 为t时刻的残余分量。

为了得到各个 IMF 的瞬时功率*f_n*,利用希尔 伯特-黄变换进行时间-频率转换,可表示如下:

$$\begin{cases} \tilde{F}_{n,t} = \frac{1}{\pi t} F_{n,t} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{F_{n,t}}{t - \tau} dt \\ = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{F_{(n,t-s)}}{\tau} d\tau \\ \omega_{n,t} = F_{n,t} + j \tilde{F}_{n,t} = a_{n,t} e^{j\theta_{n,t}} \\ a_{n,t} = \sqrt{\tilde{F}_{n,t}^2 + F_{n,t}^2} \\ \theta_{n,t} = \arctan(\frac{\tilde{F}_{n,t}}{F_{n,t}}) \\ f_{n,t} = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta_{n,t}}{dt} \end{cases}$$
(8)

式中: \tilde{F}_{nt} 为第n个IMF的HHT形式; $F_{(nt-s)}$ 为在t-s

时刻的第 $n \uparrow IMF; \omega_{n,t} \supset P_t^{HES}$ 的解析信号; $a_{n,t}, \theta_{n,t}$ 分别为第 $n \uparrow IMF$ 的瞬时振幅和瞬时相位。

故锂电池与超级电容所分配的功率可表示为

$$\begin{cases} P_{t}^{\text{LC}} = \zeta_{t} + \sum_{n=1}^{N_{u}} \begin{cases} F_{n,t} & f_{n,t} \leq f_{c} \\ 0 & f_{n,t} > f_{c} \end{cases} \\ P_{t}^{\text{SC}} = \sum_{n=1}^{N_{u}} \begin{cases} F_{n,t} & f_{n,t} > f_{0} \\ 0 & f_{n,t} \leq f \end{cases} \end{cases}$$
(9)

式中:f_c为固定分频点;P^{LC},P^{sC}分别为t时刻低于 与高于固定分频点的IMF之和,分别为锂电池与 超级电容在t时刻的分配功率。

4 两阶段鲁棒配置与优化运行模型

4.1 混合储能的两阶段模型基本框架

第一阶段为鲁棒配置模型,根据新能源场站 与工业大用户的年历史运行数据构建风电出力 的不确定性合集,并选取典型日极端出力情况为 优化依据,以风电场与混合储能组成的一体化发 电系统在典型日内收益最大为目标构建混合储 能的鲁棒配置模型。第一阶段优化在日前尺度 上,此时总周期*T*₁=24 h,间隔*t*₁=1 h。

第二阶段为混合储能的优化运行模型,以第 一阶段优化配置方案为约束,在一体化系统运行 收益基础上以最小化并网净负荷波动为目标构 建混合储能的优化运行模型,从而进一步提升新 能源场站并网友好性。第二阶段优化在日内尺 度上,此时总周期*T*₂=4 h,间隔*t*₂=0.5 h。两阶段 鲁棒配置与优化运行模型的时间轴框架如图 2 所示。



4.2 第一阶段日前尺度鲁棒配置模型

在本文构建的第一阶段发电侧混合储能的 鲁棒配置模型中,支付函数为其一体化发电系统 的年收益,具体包括:向工业大用户直供电收入 B^{SEL_B}、风电场发电并网收入或购电成本 B/C^{SEL_G}、混合储能年化投成本C^{HES}、未跟踪上与 电网电量交互计划的惩罚成本C^P,具体计算如下:

式中: $P_{t_i}^{\text{SB}}$, $\xi_{t_i}^s$ 分别为风电场向工业大用户直供电 的售电功率与单位电价; $P_{t_i}^{\text{s_c}}$ 为风-储-体化发电 系统同电网的实际交互功率,当 $P_{t_i}^{\text{s_c}} \ge 0$ 时为发 电并网,表示一体化系统的并网收入, $P_{t_i}^{\text{s_c}} < 0$ 时 为一体化系统向电网购电,表示系统的购电成 本; $\xi_{t_i}^c$ 为风电上网单位电价; ξ^{sc} 分别为不同 电池单元的单位投资成本; T_{LC} , T_{sc} 分别为不同电 池单元的使用寿命; γ 为资本贴现率; ξ^p 为未跟踪 上与电网电量交互计划的单位惩罚成本; α 为交 互计划的允许偏差; $P_{t_i}^{\text{MES}} \ge 0$ 表示混合储能充 电,反之为放电; $P_{t_i}^{\text{s_c}}$ 为风电预测出力。

利用鲁棒理论,根据文献[18]中的鲁棒分析 法,可构建如下不确定性集合:

$$\begin{cases} P_{i}^{W_{-A}} = P_{i}^{W_{-S}} + \gamma_{w} \Delta P_{i}^{W,max} \\ ||\gamma_{w}||_{\infty} = \max|\gamma_{w}| \\ ||\gamma_{w}||_{1} = \sum_{i=1}^{N_{v}} |\gamma_{w}| \\ \text{s.t.} \quad ||\gamma_{w}||_{\infty} \leq 1, ||\gamma_{w}||_{1} \leq \Gamma_{w} \end{cases}$$
(11)

其中

$$\Gamma_{w} = N_{w} \sqrt{\frac{2\sigma_{w}^{2}}{\pi}} + \Phi^{-1}(\alpha_{w}) \sqrt{N_{w}(\sigma_{w}^{2} - \frac{2\sigma_{w}^{2}}{\pi})} \quad (12)$$

式中: $\Delta P_i^{w,max}$ 为在年历史数据中风电场预测与实际功率相比的最大偏差; $\|\cdot\|_s$, $\|\cdot\|_1$ 分别为无穷范数与摄动量 1-范数约束; γ_x 为风电场的偏差系数; N_x 为风电场中发电单元的细化个数; Γ_x 为风

电场不确定性空间约束参数; σ_x 为 Γ_x 偏差的方差,实际情况下偏差的分布情况可通过统计分析 得到; α_x 为置信概率; ϕ 为根据出力预测精度预 先设计的定值,为标准正态分布函数。

利用 $\|\gamma_{w}\|_{1}$ 与 Lindeberg-levy 中心极限定理引入 Γ_{w} ,可通过灵活调整边界,从而平衡投资经济性 与系统运行鲁棒性。

依据大量历史数据分析,可假设风电出力偏差呈标准正态分布,此时预测精度仅为 68.27%^[18]。本文采用系统运行在极端情况外的概率值(probability of exceedence, POE)为指标量 化系统鲁棒性, POE可表示如下:

$$POE = \exp(-\frac{(\Gamma_{w})^{2}}{2N_{w}})$$
(13)

此外,在第一阶段鲁棒优化混合储能的容量 配置时,还需满足不同类型储能单元的电量约束:

$$\begin{cases} SOC_{\min}^{LC} \cdot E_{R}^{LC} \leq E_{t_{i}}^{LC} \leq SOC_{\max}^{LC} \cdot E_{R}^{LC} \\ SOC_{\min}^{SC} + E_{R}^{SC} \leq E_{t_{i}}^{SC} \leq SOC_{\max}^{SC} \cdot E_{R}^{SC} \end{cases} \quad \forall t_{1} \quad (14)$$

式中: SOC_{min}^{LC} , SOC_{max}^{LC} 分别为锂电池的最小、最大 电荷状态; SOC_{min}^{SC} 分别为超级电容的最 小、最大电荷状态; $E_{t_i}^{LC}$, $E_{t_i}^{SC}$ 分别为锂电池与超级 电容储能单元在 t_i 时刻的电量。

上述变量不仅与当前时刻各储能单元的充 放电功率相关,还与上时刻储能单元的电量相 关,具体计算如下:

$$\begin{cases} E_{t_{i}}^{\text{LC}} = E_{t_{i}-1}^{\text{LC}} - P_{t_{i}}^{\text{LC}} \\ E_{t_{i}}^{\text{SC}} = E_{t_{i}-1}^{\text{SC}} - P_{t_{i}}^{\text{SC}} \end{cases}$$
(15)

4.3 第二阶段日内尺度优化运行模型

在一体化系统运行收益基础下构建以并网 净负荷波动¹⁰¹最小化为目标的混合储能第二阶段 日内优化运行模型,具体计算如下:

$$\begin{cases} \min f = B^{\text{SEL_IB}} + B/C^{\text{SEL_G}} - C^{\text{P}} - C^{\text{Wa}} \\ B^{\text{SEL_IB}} = \sum_{t_z=1}^{T_z} (P^{\text{SIB}}_{t_z} \xi^{\text{S}}_{t_z}) \\ B/C^{\text{SEL_G}} = \sum_{t_z=1}^{T_z} \begin{cases} P^{\text{S_G}}_{t_z} \xi^{\text{G}}_{t_z} & P^{\text{S_G}}_{t_z} \ge 0 \\ P^{\text{S_G}}_{t_z} \xi^{\text{S}}_{t_z} & P^{\text{S_G}}_{t_z} < 0 \end{cases} \\ P^{\text{S_G}}_{t_z} \xi^{\text{S}}_{t_z} & P^{\text{S_G}}_{t_z} < 0 \end{cases} \\ P^{\text{S_G}}_{t_z=1} \begin{cases} \xi^{\text{P}} [P^{\text{S_G}}_{t_z} \xi^{\text{C}}_{t_z} - (1+\alpha)P^{\text{S_G}}_{t_z}] & P^{\text{S_G}}_{t_z} \ge (1+\alpha)P^{\text{S_G}}_{t_z} \\ \xi^{\text{P}} [(1-\alpha)P^{\text{S_G}}_{t_z} - P^{\text{S_G}}_{t_z}] & P^{\text{S_G}}_{t_z} < (1-\alpha)P^{\text{S_G}}_{t_z} \\ \end{cases} \\ C^{\text{Wa}}_{t_z} = \lambda \sum_{t_z=2}^{T_z} |P^{\text{S_G}}_{t_z} - P^{\text{S_G}}_{t_z} - P^{\text{S_G}}_{t_z} \\ P^{\text{S_G}}_{t_z} = P^{\text{W_A}}_{t_z} - P^{\text{SIB}}_{t_z} - P^{\text{HES}}_{t_z} \\ P^{\text{S_G}}_{t_z} = P^{\text{W_S}}_{t_z} - P^{\text{SIB}}_{t_z} \end{cases}$$

式中:*C*^{wa}为并网净负荷波动成本;λ为波动折算 因子。

5 鲁棒配置与优化运行模型的求解

混合储能系统的两阶段鲁棒配置与优化运 行求解流程如图3所示。



图3 混合储能系统的两阶段鲁棒配置与优化运行求解流程

Fig.3 The solving process of two-stage robust configuration and optimal operation of hybrid energy storage system

通过混合储能的鲁棒配置与优化运行实现 最佳收益的优化问题具有复杂约束与强非线性 特征,无法直接利用求解器求解。为求解相关问 题寻找具有可行性的全局最优解,可采用在复杂 约束条件上具有显著优势的飞蛾扑火算法(improve moth flame optimization, IMFO)^[19]进行求解。 IMFO基于标准 MFO,文献[20]证明了 MFO 较经 典粒子群与遗传算法具有更快的收敛精度与更 高的准确度,此外 MFO 在处理复杂约束条件的优 化问题上具有明显优势。

需要说明的是,为应对启发式算法带来的随 机性,本文算例分析中所有结果为在IMFO算法 下独立运行30次的最小值对应的结果。

6 算例分析

6.1 基础参数

本文选取我国某省某90 MW 风电场^[21]的实际运行数据构建算例。参考文献[9]将混合储能系统各类型储能单元的参数设置如表1所示;参考2017年我国各类发电技术在不同资源区上网价格均值^[22],将新能源上网电价设置为550元/(MW·h),新能源场站与电网交互计划的允许偏差设置为±10%;依据上网电价将对新能源电站的惩罚成本设置为1000元/(MW·h),将贴现率设置为3.24。

表1 混合储能系统各类型储能单元参数设置

Tab.1 Parameter settings of various types of energy storage units of hybrid energy storage system

类型	投资成本/ [元・(kW・h) ⁻¹]	使用 年限/a	电荷状态 范围	分频点/ Hz
锂电池	325	20	0.2~0.9	0.000.5
超级电容	1 000	50	0.1~0.95	0.000 3

6.2 风电场实际运行产生需求分解

将该风电场月度实际运行与预测数据合成 出力偏差,由此出力偏差引发场站对储能的需 求,进而通过EMD分解成几个IMF相加形式。

月度风电场实际运行需求分解如图4所示。 图4中IMF₀代表原始需求功率,IMF₁~IMF₀代表分 解后的各阶分量,残余分量为0.1937。图中易看 出,随着分量阶数不断增加,其瞬时频率逐渐减 小,IMF₆与IMF₇之间频率混叠最少。利用HHT 得到各阶IMF的瞬时频率后,对各IMF在逐个时 段进行分组,进而得到对锂电池单元与超级电容 单元的需求功率。



Fig.4 Demand decomposition of monthly wind farm operation

各类型储能单元的月度需求划分如图5所示。图5中,P^{sc}为具有高瞬时频率的需求分量,符合超级电容平抑高频率波动功率分量的响应特征;P^{ic}为具有大幅值与低瞬时频率的需求分量,符合锂电池平抑大幅值、低频率波动的功率分量的响应特征。

6.3 混合储能的鲁棒配置方案分析

第一阶段在5.2小节分析的基础上,考虑图6 所示的典型日风电场的预测功率、风电场的极端 出力偏差、工业用户的负荷需求求解混合储能系 统的鲁棒配置。

针对式(12)中的可灵活调整不确定合集 Γ_{x} , 设置 N_{x} 为10, α_{x} 为60%。在此情况下,本文所提 发电侧混合储能与单一类型储能在典型日风电 场出力偏差在上边界的极端情况下的配置方案 与一体化发电系统的年化收益对比如表2所示。

由表2可推知由于超级电容的单位投资成本 较高,混合储能较单一储能形式的储能年化投资 成本高出31.51%。但混合储能能够满足场站不



同频段的功率需求,可提高大规模风电场的友好 并网能力实现风电的高效利用,因此混合储能较 单一储能形式系统总收益提高5.54%,提高的总 收益主要来自于友好并网能力提高后增加的上 网收益与风电高效利用后降低的惩罚成本。不 同形式下一体化系统的上网电量的情况对比如 图7所示。由图7可知,混合储能形式下系统在 典型日的上网电量要略多于单一储能形式下的, 尤其表现在01:00—06:00时,上述情况与表2分 析结果相吻合。



power generation system in different forms

Tab.2 Comparison of configuration schemes and annual income of hybrid energy storage and single type energy storage of generation side

	储能类型	配置容量/MW	上网收益/元	投资成本/元	惩罚成本/元	总收益/元
泪入は出	锂电池	锂电池 30 1.275.00	1.275+09	7.425+05	9 29E 107	2.565+09
底合 惦 超线	超级电容	14	1.2/E+08	7.43E+03	8.28E+07	5.50E+08
单一储能	锂电池	35	1.17E+08	5.09E+05	9.33E+07	3.36E+08

6.4 混合储能的优化运行策略分析

第二阶段选取该风电场在随机日01:00— 05:00时的预测与实际出力,如图8所示。为依 据进行混合储能系统的运行优化,其中向大工业 用户的供电量不变。在上述情况下混合储能中 各类型储能单元的调度计划如图9所示。



field at the intraday scale of random days

从图9可以看出,EMD与HHT将大规模风电场对混合储能的总体需求,按照IMF的瞬时频率进行功率分配,超级电容与锂电池分别跟随HES



的低频分量及高频分量的波动规律。

为进一步说明混合储能对平抑场站上网电 量波动的贡献,一体化发电系统的计划上网电量 与实际上网电量对比情况如图10所示。

从图10可以看出,本文所提第二阶段的一体



图 10 一体化发电系统的计划与实际上网电量对比情况 Fig.10 The comparison between planned and actual on grid electricity quantity of integrated power generation system

化发电系统的运行调度模型最大限度地平抑了 上网电量的波动。在00:30—01:00,03:00—04:00 时段内分别平抑了计划上网电量的 6.5% 与 14.6%,且各时段上网电量均在允许偏差范围内, 减缓了对电网的冲击,更进一步提升了大规模新 能源场站并网的友好能力。

7 结论

为提升新能源场站配套储能设施的投资经 济性与运行灵活性,提高大规模新能源场站向大 用户直供电的稳定性与并网友好性,提出发电侧 混合储能两阶段鲁棒配置与优化运行策略,主要 结论如下:

1)所提日前尺度的混合储能鲁棒配置方案 在极端情况下的配置方案较配置单一类型的储 能提高一体化发电系统的总体收益5.54%,其中 提高新能源上网收益8.5%、减少惩罚成本11.3%, 表明混合储能模式能增加大规模新能源场站的 运营收益、提升向工业用户直供电的稳定性。

2) 所提日内尺度的一体化发电系统优化运 行策略在随机日01:00—04:00 的调度计划,可平 抑上网电量 14.6%,表明该策略可促进大规模新 能源发电并网的友好性。

本文的未来工作主要为研究具有间断性发 电特征的大规模光伏场站的混合储能选型与优 化配置,促进新能源与储能的协同发展。

参考文献

 [1] 发展改革委.能源局关于推进电力源网荷储一体化和多能 互补发展的指导意见[J].中华人民共和国国务院公报,2021 (12):59-62.

National Development and Reform Commission. The guidance of energy bureau on promoting the integration of power grid and storage and multi-energy complementary development[J]. The Bulletin of the State Council of the People's Republic of China, 2021(12):59–62.

 [2] 李笑竹,陈来军,杜锡力,等.考虑退役动力电池衰减特性的新能源场站群共享储能长期规划配置[J].太阳能学报, 2022,43(5):499-509.

LI X Z, CHEN L J, DU X L, et al. Study on long-term planning of shared energy storage at power generation considering attenuation characteristics of retired power batteries[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(5):499–509.

- [3] 王少林,韩鑫磊,王海磊.新能源场站储能系统的鲁棒优化 配置策略[J].现代电力,2021,38(6):636-644.
 WANG SL,HAN XL,WANG HL. Robust optimization configuration strategy for energy storage system of new energy station
 [J]. Modern Electric Power,2021,38(6):636-644.
- [4] 谢丽蓉,郑浩,魏成伟,等.兼顾补偿预测误差和平抑波动的 光伏混合储能协调控制策略[J].电力系统自动化,2021,45
 (3):130-138.

XIE L R,ZHENG H,WEI C W, et al. Coordinated control strategy of photovoltaic hybrid energy storage considering prediction error compensation and fluctuation suppression[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(3):130–138.

[5] 袁虎玲,刘福锁,侯玉强,等.一种考虑备用且与紧急控制相协调的风机高频保护整定方法[J].电力系统保护与控制, 2017,45(7):77-83.

YUAN H L, LIU F S, HOU Y Q, et al. A tuning method for high-frequency protection program of fans considering emergency reserve and coordination with emergency control[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7):77–83.

- [6] 杨丘帆,王琛淇,魏俊红,等.提升电网惯性与一次调频性能的储能容量配置方法[J].电力建设,2020,41(10):116-124.
 YANG Q F, WANG C Q, WEI J H, et al. Capacity allocation of energy storage system for improving grid inertia and primary frequency regulation[J]. Electric Power Construction, 2020, 41 (10):116-124.
- [7] DILEEP K, CHEN Y W, KAMESHWAR P, et al. The sharing economy for the electricity storage[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1):556-567.
- [8] HUANG Q, HUANG R, HAO W, et al. Adaptive power system emergency control using deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1171-1182.
- [9] 张雯雯,魏震波,郭毅,等.含混合储能的交直流配电网日经济优化运行[J].高电压技术,2022,48(2):565-576.
 ZHANG W W, WEI Z B, GUO Y, et al. Optimal daily economic operation of AC/DC distribution network with hybrid energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2022,48(2):565-576.
- [10] 郑浩,谢丽蓉,叶林,等.考虑光伏双评价指标的混合储能平 滑出力波动策略[J].电工技术学报,2021,36(9):1805-1817. ZHENG H,XIE L R,YE L, et al. Hybrid energy storage smoothing output fluctuation strategy considering photovoltaic dual evaluation indicators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2021,36(9):1805-1817.
- [11] 葛乐,袁晓冬,王亮,等.面向配电网优化运行的混合储能容量配置[J].电网技术,2017,41(11):3506-3513.
 GE L, YUAN X D, WANG L, et al. Capacity configuration of

hybrid energy storage system for distribution network optimal ope-ration[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3506–3513.

[12] 安星锟,杨中平,王玙,等.基于改进型凸优化算法的有轨电 车混合储能系统容量配置帕累托解集[J].电工技术学报, 2020,35(14):3116-3125.

AN X K, YANG Z P, WANG Y, et al. Pareto solution set of tram hybrid energy storage system capacity allocation based on improved convex optimization[J].Transactions of China Electro-technical Society, 2020, 35(14):3116-3125.

- [13] 苏浩,张建成,冯冬涵,等.模块化混合储能系统及其能量管 理策略[J].电力自动化设备,2019,39(1):127-133,140.
 SU H,ZHANG J C,FENG D H, et al. Modular hybrid energy storage system and its energy management strategy[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(1):127-133,140.
- [14] 靳雯皓,刘继春,刘俊勇.基于复合储能系统的微网联络线 功率优化[J].电力自动化设备,2018,38(6):22-28,33.
 JIN W H,LIU J C,LIU J Y. Microgrid tie line power optimization based on hybrid energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(6):22-28,33.
- [15] 张鹏,张峰,梁军,等.采用小波包分解和模糊控制的风电机 组储能优化配置[J].高电压技术,2019,45(2):609-617. ZHANG P,ZHANG F,LIANG J, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage system for wind farm using wavelet packet decomposition and fuzzy control[J]. High Voltage Engineering,2019,45(2):609-617.
- [16] 何俊强,师长立,马明,等.基于元模型优化算法的混合储能 系统双层优化配置方法[J].电力自动化设备,2020,40(7): 157-164.

HE J Q, SHI C L, MA M, et al. Bi-level optimal configuration method of hybrid energy storage system based on meta model optimization algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7):157–164.

 [17] 方济城,杨俊杰,樊安洁,等.基于需量管理的工业园区混合 储能配置及运行优化研究[J].计算机应用与软件,2021,38
 (10):45-52.

FANG J C, YANG J J, FAN A J, et al. Optimized configuration

of hybrid energy storage in industrial park based on demand management[J]. Computer Applications and Software, 2021, 38 (10):45-52.

[18] 李笑竹,王维庆,王海云,等.考虑荷源双侧不确定性的跨区 域灵活性鲁棒优化运行策略[J].高电压技术,2020,46(5): 1538-1549.

LI X Z, WANG W Q, WANG H Y, et al. Robust optimized operation strategy for cross-region flexibility with bilateral uncertainty of load source[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1538–1549.

- [19] 李笑竹,王维庆,王海云,等.基于鲁棒优化的风光储联合发 电系统储能配置策略[J].太阳能学报,2020,41(8):67-78.
 LI X Z, WANG W Q, WANG H Y, et al. Energy storage allocation strategy of wind-solarstorage combined system based on robust optimization[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41 (8):67-78.
- [20] MIRJALILI S. Moth-flame optimization algorithm; a novel nature-inspired heuristic paradigm[J]. Knowledge-based Systems, 2015,89(Nov.);228-249.
- [21] 司杨,陈来军,陈晓弢,等.基于分布鲁棒的风-氢混合系统 氢储能容量优化配置[J].电力自动化设备,2021,41(10):3-10.

SI Y, CHEN L J, CHEN X T, et al. Optimal capacity allocation of hydrogen energy storage in wind-hydrogen hybrid system based on distributionally robust[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 3–10.

[22] 黄南天,包佳瑞琦,蔡国伟,等.多主体联合投资微电网源-储多策略有限理性决策演化博弈容量规划[J].中国电机工 程学报,2020,40(4):1212-1225,1412.

HUANG N T, BAO J R Q, CAI G W, et al. Multi-agent joint investment microgrid source-storage multi-strategy bounded rational decision evolution game capacity planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1212–1225, 1412.

> 收稿日期:2023-07-17 修改稿日期:2023-08-02

不平衡电网电压下基于无模型自适应控制的 WECS控制研究

赵晨聪¹,谢宙桦²,周飞航³

(1.西安文理学院信息工程学院,陕西西安710065;
2.西安热工研究院有限公司,陕西西安710054;
3.西安邮电大学自动化学院,陕西西安710121)

摘要:不平衡电网电压会影响风能转换系统(WECS)的正常并网运行,导致系统输出功率的波动以及输出 电流的畸变。此外,在实际的永磁同步风电系统中可能会由于环境温度的变化以及检测误差等原因使得网侧 电路参数存在不确定性的问题,如果参数发生改变,传统控制方法的性能将会下降。基于此,提出了一种基于 灰色预测的无模型自适应控制(MFAC)方案,以缓解因电路参数不确定性导致的性能下降问题,使控制系统具 有更好的抗干扰能力。此外,采用三种独立的控制方法来解决不平衡电网电压下并网输出功率的波动及电流 畸变问题。仿真对比结果表明,所提控制策略不仅在电路标称参数下具有良好的静态和动态性能,而且当网 侧电感参数变化时,系统的鲁棒性也得到提高,验证了所提方案的优越性。

关键词:不平衡电网电压;WECS控制策略;灰色预测;MFAC方案;参数不确定性 中图分类号:TM28 文献标识码:A DOI:10.19457/j.1001-2095.dqcd25123

Research on WECS Control Based on Model-free Adaptive Control Under Unbalanced Grid Voltage ZHAO Chencong¹, XIE Zhouhua², ZHOU Feihang³

(1.School of Information Engineering, Xi' an University, Xi' an 710065, Shaanxi, China; 2.Xi' an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi' an 710054, Shaanxi, China; 3.School of Automation, Xi' an University of Posts and Telecommunications, Xi' an 710121, Shaanxi, China)

Abstract: Unbalanced grid voltage will affect the normal grid connection operation of the wind energy conversion system (WECS), resulting in fluctuations in system output power and distortion of output current. In addition, in the actual permanent magnet synchronous wind power system, there may be uncertainties in the network side circuit parameters due to changes in ambient temperature and detection errors. If the parameter changes, the performance of traditional control methods will decline. Based on this, a model-free adaptive control (MFAC) scheme based on grey prediction was proposed to alleviate the performance degradation problem caused by parameter uncertainty and make the control system have better anti-interference ability. Furthermore, three independent control methods were adopted to solve the problem of grid connected output power fluctuation and current distortion under unbalanced grid voltage. The simulation results show that the proposed control strategy not only has good static and dynamic performance under nominal parameters, but also improves the robustness of the system when the grid side inductance changes, which verifies the superiority of the proposed scheme.

Key words:unbalanced grid voltage; wind energy conversion system(WECS)control strategy; grey prediction; model-free adaptive control(MFAC) scheme; parameter uncertainties

近年来,我国正着力推动能源结构的调整与 改造提升,能源结构正从以煤炭为主向多元化过 渡,能源消费结构也更加低碳化。在2021年9 月,我国提出要力争于2030年前达到碳峰值,努 力争取于2060年前实现碳中和。风力发电具有 清洁、低碳、环保等多方面优点,并且在国家政策

基金项目:陕西省教育厅科学研究计划项目(23JK0632);陕西省自然科学基金项目(2023-JC-QN-0515) 作者简介:赵晨聪(1991--),女,博士,讲师,主要研究方向为新能源发电并网控制,Email:zccbstqk@163.com 的大力推动下,我国风能利用水平不断提升。由 于风力发电具有间歇性和波动性,若将大规模风 电接入电网,则电网的可靠运行会受到冲击^[1-2], 并且实际的电网易受到不平衡负载及故障等因 素的影响,进而出现电压不平衡的现象。此外, 考虑到在实际的永磁同步风电系统中可能会由 于环境温度的变化以及检测误差等原因使得风 电系统电路参数存在不确定性的问题,进而影响 系统的运行性能。因此,研究不平衡电网电压下 具有参数不确定性的风能转换系统(wind energy conversion system,WECS)控制策略具有重要意义。

当电网电压出现不平衡情况时,永磁同步风 电系统的并网功率会出现波动,输出电流会出现 谐波畸变等问题。针对输出功率的波动以及电 流的畸变,主要有三种控制方式:1)平衡正序控 制(balanced positive sequence control, BPSC):在 该控制方案下三相输出电流是正弦且平衡的,但 是有功功率和无功功率将出现二倍频波动;2)正 负序补偿控制(positive and negative sequence compensation control, PNSC):在该控制方案下有功功 率是稳定的,无功功率的波动依然存在,三相输 出电流虽然是正弦的,但三相峰值电流不平衡; 3)瞬时有功无功控制(instantaneous active-reactive power control, IARC): 在该控制方案下, 输出的有 功和无功功率均是稳定的,但是三相输出电流是 畸变的。为了抑制有功功率的波动,文献[3-4]中 提出了一种双电流环PI控制方案,分别控制正序 分量和负序分量。然而,该方案需要多个PI控制 器,并且控制器的参数整定较为复杂。同时,正、 负序分量的分离不可避免,增加了控制结构的复 杂性。因此,一些交流信号控制器,如比例谐振 控制器、准比例谐振控制器和比例积分谐振控制 器也逐步应用于并网电流的控制,以避免进行 正、负序电流的分离^[5-6]。针对PWM并网变流器 的非线性和强耦合特性,文献[7]研究了一种改进 的反馈线性化控制方案,该方法不仅能够改善系 统的动态性能,而且能够提升系统的适应性。文 献[8]基于Lyapunov稳定性理论研究了一种用于 补偿系统谐波和无功功率的新方法,该方法的动 态响应速度较快。虽然上述方法都能够有效地 控制变流器并获得较好的控制效果,但它们均依 赖于受控系统的精确建模。文献[9]采用了状态 反馈零极点配置的方法,实现了对输出电压及电 流的无差拍动态响应,降低了控制系统对模型不

确定性及参数失配的敏感性。在实际系统中,由 于受环境温度及检测误差等因素的影响,可能会 导致电感等线路参数的实际值与标称值之间存 在偏差。参数偏差在一定程度上会影响系统的 控制精度和鲁棒性。在文献[10]中提出了一种采 用改进的无差拍控制策略来实现对变流器的控 制,在滤波电感具有不确定性的情况下,解决了 电流采样误差问题,提升了系统的鲁棒性。然 而,该控制方案在电网电压不平衡情况下仅实现 了对并网变流器的控制,而网侧控制只是永磁风 电系统控制结构中的一部分,该控制方案未考虑 风速和发电机侧的影响,其整体控制性能有待进 一步验证。此外,还有一些智能控制方法也被广 泛应用于变流器的控制中,如模糊控制^[11]、神经网 络控制^[12-14]等。虽然这些算法对系统的模型精确 性要求不高,但是却对设计者的设计经验要求较 高。文献[15]提出了重复控制方法,该方法可以 实现零误差跟踪、抑制干扰并提高跟踪精度,然 而该控制器的响应速度较慢。

本文提出了一种在不平衡电网电压下基于 灰色预测的无模型自适应控制(model-free adaptive control, MFAC)的 WECS 控制策略。机侧实 现了对风能的最大功率点跟踪控制, 网侧实现了 对输出功率和直流母线电压的控制。将基于灰 色预测的 MFAC 方案应用于网侧控制中, 以改善 参数不确定性导致的性能下降问题, 提高控制系 统的抗干扰能力。此外, 还避免了复杂的参数整 定问题。在电网电压不平衡情况下, 采用所提控 制方案与传统控制方案对系统进行控制并对比, 对比结果表明所提控制方案可以进一步改善系 统的控制性能。

1 系统模型

基于永磁同步发电机(permanent magnet synchronous generator, PMSG)的WECS简化结构如图 1所示。PMSG通过机侧变流器和网侧变流器将 发电功率传输到电网。由于中间是直流环节,机 侧和网侧之间的变流器可以实现完全解耦,从而 可以更好地控制系统的输出功率。

虽然在相同的滤波效果情况下,LCL型滤波器的电感小于L型滤波器的电感小于L型滤波器的电感值,会降低设备的成本和体积。但是LCL滤波器为三阶系统,增加了二阶谐振零极点,并且参数设计也比较复杂。而L滤波器可以有效地抑制高频谐波电流,

并且不会引入谐振,其属于一阶电路,结构简单, 在抑制开关频率的谐波方面效果明显。因此,在 该WECS结构中选择采用L滤波器来验证控制方 案的合理性。此外,考虑到目前新能源并网系 统大多使用的是LCL滤波器,在后续的研究中 将会考虑LCL滤波器在WECS控制中的应用,并 作为下一步的研究方向,用于验证控制方案的有 效性。





1.1 风机模型

根据空气动力学,风力机的机械功率特性可 以表示为

$$P_{\rm m} = 0.5\rho C_{\rm p} S v^3 = 0.5\pi R^2 \rho C_{\rm p} v^3 \tag{1}$$

$$\begin{cases} C_{\rm p} = 0.58(116\lambda_{\rm m} - 0.4\beta - 5)e^{-21\lambda_{\rm m}} \\ \lambda_{\rm m} = \frac{1}{\lambda + 0.008\beta} - \frac{0.0035}{\beta^3 + 1} \end{cases}$$
(2)

式中:C_p为风能利用系数;R为风力机的叶片半径;λ为叶尖速比;β为桨距角;ω_m为风轮角速度。

根据式(1),机械转矩可以表示为

$$T_{\rm m} = \frac{P_{\rm m}}{\omega_{\rm m}} = \frac{1}{2\lambda} \pi \rho R^3 C_{\rm P}(\beta,\lambda) v^2 \qquad (3)$$

1.2 PMSG 模型

PMSG在d-q坐标系下的电压方程可表示为

$$\begin{cases} L_{sd} \frac{dI_{sd}}{dt} = -R_{s}I_{sd} + U_{sd} + \omega_{e}L_{sq}I_{sq} \\ L_{sq} \frac{dI_{sq}}{dt} = -R_{s}I_{sq} + U_{sq} - \omega_{e}\Psi - \omega_{e}L_{sd}I_{sd} \end{cases}$$
(4)

式中: U_{sd} , U_{sq} , I_{sd} , I_{sq} 分别为定子电压和电流的d,q轴分量; ω_{e} 为转子角速度; R_{s} 为定子电阻; Ψ 为定 子磁链。

PMSG的转子运动方程可表示为

$$T_{\rm m} = J \frac{\mathrm{d}\omega_{\rm m}}{\mathrm{d}t} + B\omega_{\rm m} + T_{\rm e} \tag{5}$$

式中:*J*为系统的转动惯量;*B*为发电机的摩擦 系数。

对于隐极式永磁同步发电机而言,其电磁转 矩方程可表示为

$$T_{\rm e} = \frac{3n_{\rm p}\Psi I_{\rm sq}}{2} \tag{6}$$

1.3 电网模型

根据瞬时功率理论,可得输出有功和无功功 率的表达式为

$$\begin{bmatrix} P\\Q \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_{g\alpha} & u_{g\beta} \\ u_{g\beta} & -u_{g\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix}$$
(7)

三相不平衡电网电压可以分解为正序分量、 负序分量以及零序分量,由于在三相三线制系统 中,无零序分量的流通路径,所以零序分量不予 以考虑,因此,式(1)可以被重新改写为

$$\begin{bmatrix} P_{0} \\ P_{\text{ripple}} \\ Q_{0} \\ Q_{\text{ripple}} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_{g\alpha}^{+} i_{\alpha}^{+} + u_{g\alpha}^{-} i_{\alpha}^{-} + u_{g\beta}^{+} i_{\beta}^{+} + u_{g\beta}^{-} i_{\beta}^{-} \\ u_{g\alpha}^{+} i_{\alpha}^{-} + u_{g\alpha}^{-} i_{\alpha}^{+} + u_{g\beta}^{+} i_{\beta}^{-} + u_{g\alpha}^{-} i_{\beta}^{+} \\ u_{g\beta}^{+} i_{\alpha}^{-} + u_{g\beta}^{-} i_{\alpha}^{-} - u_{g\alpha}^{+} i_{\beta}^{+} - u_{g\alpha}^{-} i_{\beta}^{+} \\ u_{g\beta}^{+} i_{\alpha}^{-} + u_{g\beta}^{-} i_{\alpha}^{+} - u_{g\alpha}^{+} i_{\beta}^{-} - u_{\alpha}^{-} i_{\beta}^{+} \end{bmatrix} (8)$$

式中: P_0 , Q_0 分别为有功和无功功率的直流分量; P_{ripple} , Q_{ripple} 分别为有功和无功功率的波动分量。

并网变流器在*α-β*坐标系下的电压方程可 表示为

$$u_{g\alpha\beta} = u_{\alpha\beta} - R_{\rm f} i_{\alpha\beta} - L \frac{{\rm d} i_{\alpha\beta}}{{\rm d} t} \tag{9}$$

式中: u_{gob} , u_{cop} 分别为 α - β 坐标系下的电网电压及 变流器端电压; R_{f} 为电阻;L为滤波电感,主要滤 除的是谐波电流; i_{op} 为输出电流。

1.4 机侧和网侧传统控制

在理想电网情况下,永磁同步风电系统机侧 变流器和网侧变流器的传统控制结构分别如图 2a和图 2b所示。机侧主要用于控制 PMSG 的转 矩,并在额定风速以下实现最大风能跟踪控制。 通常机侧采用 i_a=0 的控制策略, i_{quef} 可以通过转矩 计算出来。网侧控制采用双闭环控制结构,外环 用于控制直流母线电压和无功功率,内环用于控 制电流。虽然这种控制方法在正常电网下具有 良好的控制性能,但当电网电压出现不平衡情况 时,会导致直流母线电压及输出功率出现波动、 电流产生畸变。因此,在不平衡电网电压下若要 保证永磁同步风电系统取得良好的并网效果,必 须对该控制策略予以修正。



Fig.2 Traditional control structure of machine side and grid side

2 参考电流的计算

在电网电压不平衡的情况下,系统会出现输 出功率波动以及电流畸变,因此并网变流器的控 制目标主要是以抑制输出有功功率波动、抑制无 功功率波动以及抑制电流负序分量来展开的。

在此,选取BPSC,PNSC以及IARC这三种网 侧变流器的控制方式,来验证本节所提控制方案 的有效性。

1)BPSC:如果采用这种控制方式,将会抑制 负序电流,虽然三相并网电流的平衡度和正弦度 较高,但由于系统中还含有负序电压,负序电压 和正序电流互相影响,输出功率将会出现波动。 此控制方式下的电流参考表达式为

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}^{*} \\ i_{\beta}^{*} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \frac{P^{*}}{u_{g\alpha}^{*2} + u_{g\beta}^{*2}} \begin{bmatrix} u_{g\alpha}^{*} \\ u_{g\beta}^{*} \end{bmatrix} + \frac{2}{3} \frac{Q^{*}}{u_{g\alpha}^{*2} + u_{g\beta}^{*2}} \begin{bmatrix} u_{g\beta}^{*} \\ - u_{g\alpha}^{*} \end{bmatrix}$$
(10)

2)PNSC:如果采用这种控制方式,有功功率 的波动会被有效地抑制。并网电流的正弦度虽 然较高,但是却不平衡,这种控制方式下的电流 参考表达式为

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}^{*} \\ i_{\beta}^{*} \end{bmatrix} = \frac{2P^{*}}{3} \begin{bmatrix} \frac{u_{g\alpha}^{+} - u_{g\alpha}^{-}}{u_{g\alpha}^{+2} + u_{g\beta}^{+2} - u_{g\alpha}^{-2} - u_{g\beta}^{-2}} \\ \frac{u_{g\beta}^{+} - u_{g\beta}^{-} - u_{g\alpha}^{-2} - u_{g\beta}^{-2}}{u_{g\alpha}^{+2} + u_{g\beta}^{+2} - u_{g\alpha}^{-2} - u_{g\beta}^{-2}} \end{bmatrix} + \frac{2Q^{*}}{3} \begin{bmatrix} \frac{u_{g\beta}^{+} + u_{g\beta}^{-} + u_{g\beta}^{-2} + u_{g\beta}^{-2}} \\ -u_{g\alpha}^{+} - u_{g\alpha}^{-2} + u_{g\beta}^{-2} \\ \frac{u_{g\alpha}^{+2} + u_{g\beta}^{+2} - u_{g\alpha}^{-2} - u_{g\beta}^{-2}}{u_{g\alpha}^{+2} + u_{g\beta}^{+2} - u_{g\alpha}^{-2} - u_{g\beta}^{-2}} \end{bmatrix}$$

$$(11)$$

3)IARC:如果采用这种控制方式,系统的输 出有功和无功功率均较为平滑。但三相输出电 流不平衡而且畸变严重。该控制方式下的电流 参考表达式为

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}^{*} \\ i_{\beta}^{*} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \frac{P^{*}}{u_{g\alpha}^{2} + u_{g\beta}^{2}} \begin{bmatrix} u_{g\alpha} \\ u_{g\beta} \end{bmatrix} + \frac{2}{3} \frac{Q^{*}}{u_{g\alpha}^{2} + u_{g\beta}^{2}} \begin{bmatrix} u_{g\beta} \\ - u_{g\alpha} \end{bmatrix} (12)$$
70

3 控制方案设计

在实际的永磁同步风电系统中可能会由于 环境温度的变化以及检测误差等使网侧电路参 数存在不确定性的问题,如果参数发生变化,传 统控制方法的性能会下降。由于MFAC控制是一 种基于数据驱动的控制器,只依赖于输入和输出 数据,不需要被控对象的精确模型。灰色预测算 法主要用于解决"小数据"不确定性系统的预测 问题,即系统中的一部分信息是已知的,同时还 存在一部分未知的信息。因此,有必要研究永磁 同步风电系统在参数不确定情况下基于灰色预测 的MFAC控制方案,进而提高系统的抗干扰能力。

3.1 MFAC

MFAC方法是建立在伪偏导数的概念之上, 基于动态线性化的模型设计控制器,并进行相应 的控制理论分析。利用伪偏导数实现被控对象 的动态线性化可分为紧格式、偏格式及全格式线 性化方法。本节采用紧格式动态线性化的方法。

对于单输入单输出的非线性离散系统:

 $y(k+1) = f[y(k), \dots, y(k-n_y), u(k), \dots, u(k-n_u)]$ (13)

式中:u(k),y(k)分别为k时刻下的输入和输出信号;n_y,n_u为被控对象的阶数;f(·)为非线性函数。针对紧格式动态线性化数据模型,首先对系统提出如下假设:

假设1:式(13)作为被控对象,其输入输出必须是可控、可观测的。

假设2:在系统的有限时刻点外,非线性函数 f(·)对第(n,+2)个变量求得的偏导数是连续的。

假设3:在系统的有限时刻点外,被控对象式 (13)在任意时刻k下,有 $\Delta u(k) \neq 0$,并存在:

其中

$$\begin{aligned} |\Delta y(k+1)| &\leq b |\Delta u(k)| \qquad (14) \\ &\left\{ \Delta y(k+1) = y(k+1) - y(k) \\ \Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \end{aligned} \right.$$

式中:b为大于零的常数。

对于满足上述三个假设的非线性系统,当 $\Delta u(k) \neq 0$ 时,存在伪偏导数,可以将被控对象式 (13)表示为紧格式数据模型 $\phi(k)$ 。则有:

$$\Delta y(k+1) = \phi(k)\Delta u(k) \tag{15}$$

根据式(15)的动态线性化模型,可得:

 $y(k + 1) - y(k) = \phi(k)[u(k) - u(k - 1)]$ (16) 可进一步得出,控制输入的准则函数如下: $J[u(k)] = |y^*(k+1) - y(k+1)|^2 + \lambda_y |u(k) - u(k-1)|^2$ (17)

基于该准则函数,计算u(k)的偏导数,并使 其偏导数为零,即可得到MFAC的控制量为

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\rho\phi(k)}{\lambda_{y} + |\phi(k)|^{2}} \left[y^{*}(k+1) - y(k) \right]$$
(18)

式中:ρ为步长因数,可以使控制器具有普适性, 其选取范围为ρ∈(0,1];λ,为主动引入参数,可以 对输入信号变化量进行限制,保证输入信号变化 的平缓性,从而保证系统输出的稳定性。

伪偏导数的准则函数可设计为

$$J[\phi(k)] = |y(k) - y(k-1) - \phi(k)\Delta u(k-1)|^{2} + \mu |\phi(k) - \hat{\phi}(k)|^{2}$$
(19)

对式(19)求极值,可得出伪偏导数 $\phi(k)$ 的估 计算法为

$$\hat{\phi}(k) = \hat{\phi}(k-1) + \frac{\eta \Delta u(k-1)}{\mu + \Delta u(k-1)^2} \left[\Delta y(k) - \hat{\phi}(k-1) \Delta u(k-1) \right]$$
(20)

式中:η为计算伪偏导数的步长因子,η∈(0,1]; μ为惩罚因子,它可以限制伪偏导数的变化,并防 止分母为零。

由以上分析可知,该算法可以在系统模型具 有不确定性的情况下,利用数据驱动原理,通过 伪偏导数的动态变化来改变控制量,从而满足系 统的控制要求。MFAC的控制原理如图3所示。



图3 MFAC控制器原理图

Fig.3 The schematic diagram of MFAC controller

3.2 灰色预测算法

灰色预测算法主要用于解决"小数据"不确 定性系统的预测问题,即系统中的一部分信息是 已知的,同时还存在一部分未知的信息。首先对 原始数据进行分析处理,得出具有较强规律性的 数据序列,进而生成匹配的预测模型实现对数据 的预测。

通过建立微分方程可以得到灰色模型(grey model,GM),通常表示为GM(h,j),其中h为模型

阶次,*j*为变量个数。本节选取模型为GM(1,1) 模型。在GM(1,1)模型中,有两个需要被辨识的 参数,分别为发展系数*a*和灰色作用量*u*。该算 法所需参数少,计算过程简单。算法步骤如下:

1)数据处理。首先取原始非负数据序列为

对原始数据进行累加,可得:

$$\boldsymbol{x}^{(1)} = [x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), x^{(1)}(3), \cdots, x^{(1)}(n)]^{\mathrm{T}} \quad (22)$$

其中
$$\mathbf{x}^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^{\infty} x^{(0)}(i) \quad k = 1, 2, \cdots, n$$

2)构造数据背景向量和数据矩阵:
 $\mathbf{y} = [x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \cdots, x^{(0)}(n)]^{\mathsf{T}}$ (23)
 $B = \begin{bmatrix} -0.5[x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)] & 1 \\ -0.5[x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)] & 1 \end{bmatrix}$ (24)

$$\begin{bmatrix} \vdots & \vdots \\ -0.5[x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)] & 1 \end{bmatrix}$$

式中:y为数据背景向量;B为数据矩阵,即将累加后的非负数据按照均值法计算,进而形成数据 序列。

3)GM辨识参数。针对GM(1,1)模型采用最 小二乘法,即可得出需要辨识的两个参数为

$$[a,u]^{\mathrm{T}} = (\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}$$
(25)

4)根据辨识参数,可得出时域响应模型为

 $\hat{x}^{(1)}(t) = [x^{(1)}(0) - u/a] e^{-at} + u/a \quad (26)$

5)对时域响应模型进行离散化,得出离散化 的初始数据为

 $\hat{x}^{(1)}(k) = [x^{(1)}(0) - u/a]e^{-a(k-1)} + u/a$ (27) 6)还原数据。对预测出的数据进行累减,即 可得出原始的预测值为

$$\hat{x}^{(0)}(k) = \hat{x}^{(1)}(k) - \hat{x}^{(1)}(k-1)$$
(28)

基于上述的GM(1,1)模型预测步骤可知,灰 色预测控制是将采集来的数据按照"采一个,抛 一个"的原理进行数据处理,得出此时的预测值, 并与控制系统的期望值进行比较,通过MFAC控 制器得出控制值,进而实现超前控制。灰色预测 控制结构如图4所示,在控制过程中不需要过滤 噪声,其结构简单,鲁棒性强。



Fig.4 Grey predictive control structure diagram

3.3 控制方案的实现

由于电网电压的不平衡状态对发电机侧影 响不大,发电机侧的控制策略仍采用MPPT控制, 网侧则分别以实现BPSC,IARC和PNSC作为控 制目标。为了提高系统在线路参数不确定性下 的抗干扰能力,采用基于灰色预测的MFAC控制 器实现对直流母线电压的控制。另外,采用QPR 控制器¹⁶⁶对电流进行控制,避免了正负序电流分 量的分离,提高了内环控制速度,同时也因为其 增大了谐振频率点附近的带宽,进而能有效避免 因电网频率的偏移而引起的系统稳定性问题。 所提控制方案的控制结构如图5所示。



图5 所提控制方案的实现框图



4 仿真结果分析

为了验证本文所提控制策略的有效性和优 越性,采用Matlab/Simulink对传统控制和所提出 的控制策略进行了仿真,并对仿真结果进行了对 比分析。系统的主要仿真参数如表1所示。

Tab.1 Simulation parameters					
参数	数值	参数	数值		
额定容量/MW	1.5	极对数	102		
风轮半径/m	31	定子电感/mH	0.835		
额定风速/(m⋅s⁻¹)	12	母线电压/V	1 800		
最大风能利用系数	0.476	电网电压/V	690		
空气密度/(kg·m ⁻³)	1.225	直流侧滤波电感/mH	6		
定子电阻/Ω	0.001	直流侧电阻/Ω	0.001		
转子永磁磁通量/Wb	1.25	直流电容/F	0.22		

表1 仿真参数

为了验证所提控制方案的优越性,将所提出的控制方案与传统的双电流环 PI 控制方案进行了对比分析。在 0.2~0.4 s内, A 相电压跌落了30%, 以模拟不平衡电网电压, 如图 6a 所示。短时电压暂降期间的风速如图 6b 所示。

图7和图8分别为采用传统控制策略和所提 控制策略来实现BPSC,IARC和PNSC这三个控 72



Fig.6 The three-phase unbalanced voltages and wind speed 制目标时的仿真结果。

对图7及图8进行对比可以看出,在实现BP-SC时,采用传统控制策略及所提控制策略下的输 出功率波动均较明显,但采用所提控制策略下的 直流母线电压超调很小,调节时间更短,响应时 间也更快。根据A相电流谐波频谱分析可看出, 所提控制策略下的电流正弦度及平衡度更高,A 相电流的总谐波畸变率仅为1.12%。在实现 IARC时,虽然两种控制策略下的输出功率均较 为平滑,输出电流均存在较大畸变,但是相比之 下,所提控制策略的并网电流质量有所改善。在 实现PNSC时,两种控制策略下的有功功率输出



图 8 所提控制方案针对个同目标的控制效果 Fig.8 The control effect of the proposed control scheme for different objectives

较平滑,无功功率的波动幅度大,但采用所提控制方案下的母线电压超调更小,输出电流的质量 也有所提升,A相电流的THD 仅为1.55%。综合 以上分析可知,在实现三个控制目标时,所提控 制策略的响应速度均较快,超调量较小,表现出 了明显的优越性。

为了进一步直观地分析所提控制策略的控 制性能,将传统控制策略与所提控制策略的性能 指标进行量化对比,对比结果如表2所示。由该 表可看出采用所提控制方案在实现BPSC,IARC, PNSC三种目标时A相电流的THD相比于传统控 制方案有所降低。除了无功功率的波动幅值在 实现BPSC,PNSC时相比于传统控制方案稍有增 大以外,直流母线电压波动、母线电压超调量以 及有功功率的波动幅值均有所改善,验证了所提 控制方案的优越性。

Tab.2 Quantitative comparison of performance indicators									
			A相电	流 THD/%		直流母线电压	直流母线电压	有功功率	无功功率
		总THD	3次谐波占 比	5次谐波 占比	7次谐波 占比	波动幅度/%	超调量/%	波动幅值/%	波动幅值/%
	BPSC	2.21	2.10	0.01	0.01	0.03	0.51	18.75	19.67
传统控制方案	IARC	9.64	8.64	0.47	0.03	0.03	0.33	14.35	5.27
	PNSC	3.05	2.81	0.13	0.01	0.02	0.39	15.12	31.26
	BPSC	1.12	0.86	0.01	0.00	5.50E-04	0.02	17.93	20.38
所提控制方案	IARC	8.45	5.55	0.63	0.10	5.30E-04	0.03	9.36	3.21
	PNSC	1.55	1.35	0.02	0.01	5.70E-04	0.02	8.27	33.23

表2 性能指标量化对比

为了更好地验证所提控制策略的动态性能, 图9为直流电压、输出功率及电流随风速阶跃变 化的仿真波形。在0.4 s时设置风速由10 m/s阶 跃到12 m/s,输出有功功率由0.8 MW 突增至1.5 MW。以实现 PNSC 为例,由图9可以看出,直流 母线电压始终保持稳定,不随风速的阶跃变化而 变化。同时,直流母线电压波动幅度不超过 0.005%。此外,系统输出电流和功率可以快速跟 踪风速的变化,并趋于稳态。





for PNSC changing with wind speed

在实际系统中,系统参数可能会存在不确定 性。例如,由于环境温度变化以及检测误差等因 素,电感等参数可能无法得到准确的测量值,导 致测量值与标称值之间存在偏差。现以网侧电 感作为不确定参数为例,对所提方案的有效性进 行验证。电感的标称值为6mH,电感的不确定值 为1.2mH。当系统采用标称参数时,本文所提控 制方案与文献[5]中的无差拍控制方案的控制效 果对比如图 10a 所示。当电感值变化为 7.2 mH 时,两种控制方案的控制效果对比如图 10b 所示。 以实现 IARC 为例,根据图 10 可知,在电感标称值 以及电感值变化情况下,所提方案的控制效果均 优于无差拍控制方案,可以有效地减小直流母线 电压及输出电流的超调量和调节时间。



图 10 以电感作为不确定参数下实现IARC时传统方案与 所提方案的控制效果比较



为了更好地验证所提方案在参数变化情况 下的鲁棒性,当电感L变化时,采用所提控制策略 下的仿真波形如图11所示。以实现BPSC为例, 由该图可分析出,当网侧电路中的电感仿真参数 由L=6 mH变化至L=7.2 mH时,系统的各个变量 仍可以趋于稳定,控制效果良好。



5 结论

在电网电压不平衡情况下,针对永磁同步风 电系统并网变流器中线路参数存在不确定性的 问题,为了提高系统的鲁棒性,本文提出了一种 基于灰色预测的MFAC策略,用来实现对永磁同 步风电系统的控制。首先采用所提控制方案实 现了BPSC,IARC以及PNSC,并在风速阶跃变化 下验证了所提控制方案的动态跟随性能。此外, 以网侧电感作为不确定参数,分别采用所提控制 方案与传统控制方案对系统进行控制并对比,对 比结果表明所提控制方案可以进一步改善系统 的控制性能,提高了系统的鲁棒性。

参考文献

- ZHOU Feihang, YANG Jianxiang, PANG Ji, et al. Research on control methods and technology for reduction of large-scale wind turbine blade vibration[J]. Energy Reports, 2023, 9: 912– 923.
- [2] ZHOU F. Drive-train torsional vibration suppression of large scale PMSG-based WECS[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(1):1–13.
- [3] KIM K, JEUNG Y, LEE D, et al. LVRT scheme of PMSG wind power systems based on feedback linearization[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(5):2376–2384.
- [4] SUH Y, LIPO T A. Control scheme in hybrid synchronous synchronous stationary frame for PWM AC-DC converter under generalized unbalanced operating conditions[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(3):825-835.
- [5] 李冬辉,孔祥洁,刘玲玲.单相双Buck 逆变器的无差拍快速 重复控制[J].电网技术,2019,43(10):3671-3677.

LI Donghui, KONG Xiangjie, LIU lingling. Deadbeat and fast repetitive control for single-phase dual-buck inverter[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3671–3677.

[6] 赵晨聪,刘军,谢宙桦.电网不平衡时电流限制的风电并网 变流器功率/电流灵活控制[J].电机与控制学报,2022,26 (1):137-148.

ZHAO Chencong, LIU Jun, XIE Zhouhua. Flexible power/current control of wind power grid connected converter with current limitation under unbalanced grid voltage[J]. Electric machines and control, 2022, 26(1):137–148.

- [7] BAO X W, ZHUO F, TIAN Y, et al. Simplified feedback linearization control of three-phase photovoltaic inverter with an LCL filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(6): 2739–2752.
- [8] HADDAD M, RAHMANI S, FNAIECH F, et al. A Lyapunovbased current control strategy of three phase shunt active power filter for harmonic elimination, power-factor correction, and load unbalance compensation[C]//Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IEEE, 2012.
- [9] MATTAVELLI P. An improved deadbeat control for UPS using disturbance observers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(1):206–211.
- [10] JIANG W, MA W, WANG J, et al. Deadbeat control based on current predictive correction for grid-connected converter under unbalanced grid voltage[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7):5479–5491.
- [11] HANG L J, LIU S S, YAN G, et al. An improved deadbeat scheme with fuzzy controller for the grid-side three phase PWM boost rectifier[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011,26(4):1184-1191.
- [12] CHEN M, GE S S, HOW B V E. Robust adaptive neural network control for a class of uncertain MIMO nonlinear systems with input nonlinearities[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2010, 21(5):796-812.
- [13] 谢宙桦,赵晨聪,黄万启.不平衡电压下基于RBF网络并网 变流器的控制[J]. 控制工程,2020,27(9):1573-1581.
 XIE Zhouhua, ZHAO Chencong, HUANG Wanqi. Control of grid-connected converter based on RBF network under unbalanced voltage[J]. Control Engineering of China, 2020, 27(9): 1573-1581.
- [14] 刘军,赵晨聪.电网电压不平衡时对风电并网变流器的控制研究[J].电气传动,2016,46(4):50-56.
 LIU Jun, ZHAO Chencong. Research on the control strategy for grid-connecting converter of wind power generation system under unbalanced grid voltage[J]. Electric Drive, 2016, 46(4): 50-56.
- [15] ZHANG B, WANG D W, ZHOU K L, et al. Linear phase lead compensation repetitive control of a CVCF PWM inverter[J].
 IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55 (4) : 1595-1602.

75

抑制高压直流故障引起风电场暂态过电压 控制策略

王奇¹,董新胜²,何山^{1,3}

(1.新疆大学 电气工程学院,新疆 乌鲁木齐 830017;
2.国网新疆电力科学研究院,新疆 乌鲁木齐 830011;
3.可再生能源发电与并网控制教育部工程研究中心,新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要:针对高压直流系统故障时引起送端风电场暂态过电压问题,分析了直流故障对送端暂态电压变化的影响机理,发现故障后交流系统无功盈余是造成电压骤升的根本原因。提出了一种基于分布式调相机和双 馈风机(DFIG)无功电压协调控制策略,在风电场并网母线处配置新能源分布式调相机,利用其独特的无功调 节特性稳定风电场并网电压,提高风电场的低压或高压穿越能力;在直流系统发生换相失败和直流闭锁严重 故障时,DFIG通过改变网侧和转子侧变流器无功参考参与系统无功调节,配合分布式调相机改善故障期间系 统电压,并在故障后稳态期间控制 DFIG 风电场退出无功调节,确保故障恢复后风电场的经济运行。通过 PSCAD软件仿真结果表明:在系统发生换相失败和直流闭锁故障后,提出的无功协调控制策略可有效抑制故 障后风电场暂态电压变化,提升了风机运行可靠性和经济性。

关键词:高压直流输电;风电场;分布式调相机;无功补偿;协调控制 中图分类号:TM762 文献标识码:A DOI:10.19457/j.1001-2095.dgcd25012

Control Strategy for Suppressing Transient Overvoltage in Wind Farm Caused by HVDC Faults WANG Qi¹, DONG Xinsheng², HE Shan^{1,3}

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, Xinjiang, China; 2. State Grid Xinjiang Electric Power Research Institute, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 3. Engineering Research Center of Ministry of Education for Renewable Energy Power Generation and Grid Connection Control, Urumqi 830017, Xinjiang, China)

Abstract: To address the issue of transient overvoltage at the sending end of the wind farm caused by faults in conventional high-voltage direct current systems system, the impact mechanism of DC faults on transient voltage changes at the sending end was analyzed. It was discovered that the reactive power surplus of the AC system after the fault was the root cause of the sudden voltage rise. To address this, a reactive power coordination control strategy based on distributed synchronous condensers and doubly fed induction generators(DFIG) was proposed. A distributed synchronous condenser was installed at the grid-connected bus of the wind farm to stabilize the grid-connected voltage and improve the low-voltage or high-voltage ride-through capability of the wind farm using its unique reactive power regulation characteristics. During various severe fault scenarios in the DC system, the DFIG participated in reactive power regulation by changing the reactive power reference value, and improved system voltage during the fault period with the distributed synchronous condenser. The DFIG wind farm was controlled to exit reactive power regulation during steady-state after the fault, to ensure economic operation after fault recovery. Simulation results using PSCAD software demonstrate that the proposed reactive power coordination control strategy effectively suppress transient voltage variations of the wind farm after faults, improving the reliability and economy of the wind farm, particularly during commutation failure and direct current blocking in the system.

基金项目:新疆维吾尔自治区高校科研计划项目(XJEDU20211010);自治区重点实验室开放课题(2022D04029); 自治区重点研发计划项目(2022B01003-3);国家自然科学基金(51767024)

作者简介:王奇(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为风力发电控制与并网技术,Email:1714534177@qq.com

通讯作者:董新胜(1972—),男,教授级高工,主要研究方向为高压电气设备试验及电气设备状态评价,Email:25005161072@qq.com

Key words: high-voltage direct current (HVDC); wind farm; distributed synchronous condenser; reactive power compensation; coordination control

发展风光等可再生能源已成为能源发展的 重要途径,我国西北地区可再生能源丰富,高压 直流输电成为能源输送的重要方式,但距离中心 负荷地区远,输送距离长,系统故障容易引发风 电场暂态过电压问题^[1-2]。

基于电网换相换流器的高压直流(line commutated converter high voltage direct current, LCC-HVDC)系统运行时需要消耗无功功率,容量一般 为系统输送容量的40%~60%,通常由交流滤波器 提供。直流系统发生换相失败等故障时换流站 将发生大量的无功交换,送端系统出现暂态过电 压,严重时可能引发直流近区风电机组连锁脱 网。尽管故障后双馈感应电机(doubly fed induction generator, DFIG)可以提供一定的无功功率, 但无功补偿能力有限,因此,在大规模新能源外 送系统中需要配置动态无功补偿设备,进行快 速、准确、及时的无功功率补偿或切除。动态无 功补偿设备主要有静止无功补偿器(static var compensator,SVC)、静止无功发生器(static var generator, SVG)和同步调相机^[3-5]。近年来, 新型大容 量调相机在换流站已经投入使用,工程实践证明 动态无功调节能力优异,电压改善效果明显[6-7]。 在2021年底,青海、海南地区已有21台新能源分 布式调相机投入生产,为高比例新能源地区提供 了无功电压支撑,大幅提升新能源送出水平^[8]。

为抑制直流系统故障引起的风电场站暂态 过电压问题。文献[9-10]分别采用SVC,SVG与 风电机组协调的方式来防止风电机组在故障时 期脱网。但有学者指出由于电压穿越频繁、深度 大,安装在新能源场站并网点的SVC,SVG大量损 坏,经济损失严重^[11]。文献[12]对直流换相失败 引起暂态过电压进行机理分析,通过对换流站定 电流控制环节PI参数进行优化,提高换流器消耗 无功功率,进而抑制暂态过电压,但对于薄弱的 新能源电网改变直流参数对缓解送端电压效果 有限。文献[13]研究了动态无功补偿设备对系统 短路比的影响,得出新能源场站安装分布式调相 机对电压改善效果优于SVC和SVG。文献[14]为 解决新能源集中送出面临的暂态过电压问题,研 究得出在新能源站35 kV或110 kV汇集站通过三 绕组变压器接入分布式调相机具有更好的无功 补偿效果。以上文献均提出了较为优秀的抑制 风电场暂态过电压措施,并指出调相机在改善系 统电压方面发挥了重要作用,但均未发挥DFIG 的无功调节能力,尚缺乏通过DFIG与分布式调 相机协调控制来抑制风电场暂态过电压研究。

本文首先针对直流故障时无功盈余造成送 端风电场电压波动问题,分析了DFIG和分布式 调相机的无功调节能力;然后提出分布式调相机 作为风电场端无功补偿设备,稳态时优先考虑调 相机进行无功补偿,在紧急状况下通过优化DFIG 换流器无功参考参与系统无功调节;最后仿真验 证直流系统在换相失败和直流闭锁故障后该策 略抑制送端交流系统暂态电压的可行性。

1 直流故障对送端电压影响

高压直流输电系统在稳定运行时,换流站通 常由交流滤波器提供无功功率,送端换流站无功 功率交换如图1所示。图中, Q_{de} 为直流系统整流 侧消耗的无功功率; Q_{ae} 为除风电以外的交流系统 无功功率; Q_{o} 为无功补偿装置提供的无功功率; Q_{WF} 为风电场无功功率;U为换流母线电压; U_{pee} 为风电场并网母线电压; I_{d}, U_{d} 为整流侧直流电流 和直流电压。



图 1 换流站无功功率交换示意图 Fig.1 Schematic diagram of reactive power exchange in converter station

换流站无功功率平衡关系可以表示为

$$Q_{\rm dc} = Q_{\rm ac} + Q_{\rm c} + Q_{\rm WF} \tag{1}$$

直流系统故障时,换流站无功功率不平衡, 换流母线电压变化可表示为

$$\Delta U = \frac{\Delta Q}{S_{\rm ac}} \tag{2}$$

式中: ΔQ 为换流站与送端交流系统无功差值; S_{ac} 为换流母线短路容量。

以国际大电网会议(international council on large electric systems, CIGRE)标准模型为例,系统

整流站采用定电流控制策略,逆变站采用定关断 角控制,系统稳定运行时有:

$$U_{\rm d} = U_{\rm dor} \cos\alpha - R_{\rm cr} I_{\rm d} \tag{3}$$

$$I_{\rm d} = \frac{U_{\rm dor} \cos\alpha - U_{\rm doi} \cos\beta}{R_{\rm cr} + R_{\rm d} + R_{\rm ir}} \tag{4}$$

式中: U_{dor} , U_{doi} 分别为整流侧和逆变侧空载时直 流电压; R_{er} , R_{ir} 分别为整流站和逆变站等效电阻; R_{d} 为直流系统等效电阻; α 为整流侧触发角; β 为 逆变侧逆变角。

风电场端电压骤升的原因主要有:1)直流系 统发生换相失败故障时,直流电压迅速减小,由 式(3)、式(4)可知,直流电流随之增大,直流系统 通过定电流控制增大触发角抑制电流,换流站无 功消耗激增,造成送端交流母线暂态低电压。随 着触发角持续增大,直流电流随之减小,而交流 滤波器仍发出无功功率,造成无功盈余;2)系统 发生直流闭锁后,直流系统有功输送容量将为 零,换流站无功消耗减少,而交流滤波器无法及 时切除(极控系统存在延时约200 ms),导致换流 站无功大量盈余,交流系统电压可能超过1.3(标 幺值),严重影响风电场安全运行。

2 DFIG和分布式调相机无功特性

2.1 DFIG 无功特性

DFIG风电机组的定子与电网直接相连,转子则通过背靠背变流器与电网相连^[15],DFIG功率关系如图2所示。为了保障风电场的经济运行,通常DFIG风机采用恒功率因数控制策略,当系统电压突变时,通过无功外环控制使DFIG风电机组发出或吸收部分无功功率,来维持机端电压恒定。



图 2 中, P_s , Q_s 分别为 DFIG 定子侧有功和无 功功率; P_r , Q_r 分别为转子变流器(rotor-side converter, RSC)输出的有功和无功功率; P_s , Q_s 分别 为电网输入到网侧变流器(grid-side converter, GSC)的有功和无功功率; P_w , Q_w 分别为 DFIG 输 出到电网的有功和无功功率。 DFIG 机组输出的无功功率包括电网侧变流 器输出和DFIG 定子侧输出两部分¹¹⁶。DFIG 定子 侧功率在 *d*-*q* 坐标变换下可表示为

$$\begin{pmatrix}
P_{s} = 3/2U_{s}i_{sd} \\
Q_{s} = -3/2U_{s}i_{sq}
\end{cases}$$
(5)

式中: U_s 为DIFG定子电压峰值; i_{sd} , i_{sq} 分别为定子 d轴和q轴电流。

DFIG定子侧的无功功率主要受转子绕组和 转子电流影响,其中转子励磁电流起主要作用, 当有功功率给定时,定子侧无功调节范围为

$$\begin{cases} Q_{\rm smin} = -\frac{3U_{\rm s}^2}{2X_{\rm s}} - \sqrt{\left(\frac{3}{2}\frac{X_{\rm m}}{X_{\rm s}}U_{\rm s}I_{\rm rmax}\right)^2 - P_{\rm s}^2} \\ Q_{\rm smax} = -\frac{3U_{\rm s}^2}{2X_{\rm s}} + \sqrt{\left(\frac{3}{2}\frac{X_{\rm m}}{X_{\rm s}}U_{\rm s}I_{\rm rmax}\right)^2 - P_{\rm s}^2} \end{cases}$$
(6)

式中: Q_{smin} , Q_{smax} 分别为DFIG定子侧吸收和发出的无功极限; X_s 为定子电抗; X_m 为激磁电抗; I_{max} 为转子换流器最大电流。

GSC 容量按照 DFIG 最大转差有功功率设计,其中无功调节容量主要受变流器容量限制, 无功功率调节范围为

$$\begin{cases} Q_{\text{gmin}} = -\sqrt{P_{\text{gmax}}^2 - P_{\text{r}}^2} \\ Q_{\text{gmax}} = \sqrt{P_{\text{gmax}}^2 - P_{\text{r}}^2} \end{cases}$$
(7)

式中: Q_{gmin} , Q_{gmax} 分别为DFIG 网侧变流器吸收和发出的无功极限; P_{gmax} 为GSC的最大功率。

根据式(6)、式(7),得到DFIG机组吸收和发出至电网的无功功率极限Q_{wmin}和Q_{wmax}为

$$\begin{cases} Q_{\text{wmin}} = Q_{\text{smin}} + Q_{\text{gmin}} \\ Q_{\text{wmax}} = Q_{\text{smax}} + Q_{\text{gmax}} \end{cases}$$
(8)

风电机组的RSC和GSC均可控制DFIG的无 功输出。当利用GSC提供无功时,会导致风机有 功功率发生波动,且GSC无功调节能力比定子无 功调节能力小,因此在进行DFIG无功补偿时,优 先采用RSC控制定子无功功率。

2.2 分布式调相机无功特性

调相机是一种不带机械负载或原动机的同步电机,作为动态无功补偿设备并联于电网,保障系统电压稳定,仅吸收少量有功功率用于自身损耗,功率因数接近于零。当系统发生严重故障时交流母线电压大幅波动,SVC和SVG这类基于电力电子技术的无功补偿设备受系统故障电压和过流能力的限制,在严重故障时难以提供足够的无功支撑。而同步调相机无功调节能力几乎

不受系统电压影响,且瞬时无功支撑和短时过载 能力突出,在动态无功补偿方面具有一定优势。

调相机正常运行时,消耗有功功率可以忽略,功角 $\delta \approx 0$,所以调相机机端电压d轴分量 $U_{ud} \approx 0,q$ 轴分量 $U_{uq} \approx U_{i}$,调相机发出的无功功率 Q_{sc} 为

$$Q_{\rm sc} = U_{\rm tq}I_d - U_{\rm td}I_q \approx U_{\rm t}I_d \qquad (9)$$

式中: I_d , I_q 分别为调相机定子d轴和q轴电流。

根据调相机自身运行方式,系统故障后其无 功出力可分为3个阶段。

1)次暂态无功出力阶段。系统发生故障时, 调相机机端电压由U₀突变为U₄,由于调相机内电 势无法突变,次暂态过程中定子电流发生改变, 调相机瞬时发出/吸收大量无功来支撑电网电压。 次暂态过程中调相机定子电流增量为

$$\Delta I''_{a} = (E''_{q} - U_{t})/X''_{a}$$
 (10)
式中: E''_{q} 为调相机 q 轴次暂态内电势; X''_{a} 为调相机
 d 轴次暂态电抗。

次暂态期间调相机向系统提供的瞬时无功增量 ΔQ^v_s为

$$\Delta Q_{\rm sc}'' = \Delta U_{\rm t} I_{d0} - U_{\rm t0} \Delta I_d'' \tag{11}$$

式中: ΔU_{1} 为故障前后机端电压变化值; I_{a0} 为d轴 电流初始值。

由式(11)可知,当机端电压方式变化时,调相机 可瞬间发出或消耗无功功率,且与自身参数*d*轴 次暂态电抗和机端电压变化程度有关。

2)暂态无功出力阶段。调相机通过励磁系 统短时(ms级)发出额定容量两倍以上的无功功 率,在系统发生严重故障时,提供无功电压支撑, 此阶段调相机发出的无功功率 $\Delta Q'_{sc}$ 可表示为

$$\Delta Q'_{\rm sc} = \Delta U_{\rm t} I_{d0} - \frac{\left[K_{\rm B} \left(K_{\rm A} + 1\right) - 1\right] U \Delta U_{\rm t}}{\left(X'_{d} + x_{\rm k}\right) \left(K_{\rm B} T'_{d0} + 1\right)} - \frac{U \Delta U_{\rm t}}{X'_{d} + x_{\rm k}}$$
(12)

其中

 $K_{\rm B} = \frac{X'_d + x_{\rm k}}{X_d + x_{\rm k} + K_{\rm A} x_{\rm k}}$ (13)

式中:K_A为调相机励磁放大倍数;X_d为d轴同步 电抗;X'_d为d轴暂态电抗;x_k为调相机并网变压器 短路电抗;T'_a为d轴暂态开路时间常数。

由式(12)和式(13)可知,次暂态阶段调相机无功 出力取决于调相机暂态参数*X'_a*,*T'_a*和变压器短路 电抗*x_k*,以及机端电压变化量Δ*U*₁。

3)稳态无功出力阶段。当系统故障未清除 时,调相机持续出力系统达到新的稳定状态。此 阶段无功出力Q_{sc}为

$$Q_{\rm sc} = \frac{U_{\rm t}(E_0 - U_{\rm t})}{X_d}$$
(14)

式中:E₀为调相机内电势。

系统稳定运行时,调相机无功出力与稳态参数*X_a*和机端电压*U*,相关,机端电压越高时,无功出力越大。

我国已投入使用的主要有 300 Mvar 集中式 和 50 Mvar 分布式调相机,集中式调相机主要装 设于特高压直流送、受端换流站,而分布式调相 机装设于新能源场站,且无功特性相关参数得到 进一步优化,无功响应更快,对于新能源场站可 以提供更好的无功电压支撑。分布式和集中式 调相机的主要参数对比如表1所示^[17]。

表1 调相机主要参数

Tab.1	Main para	ameters of	synchronous	condenser

<i>会 粉</i> r	50 Mvar	300 Mvar
<i>参</i> 奴	调相机	调相机
额定电压/kV	10.5	20
d 轴同步电抗 X_d /%	100.320	136.44
$q轴同步电抗X_q/\%$	100.320	128.53
d 轴暂态电抗 X'_d %	10.600	14.6
$q轴暂态电抗X'_q$ %	22.160	24.74
d 轴次暂态电抗 X''_d %	8.370	10.58
q 轴次暂态电抗 X_q'' %	8.370	10.58
d 轴暂态开路时间 T'_{d0} /s	7.383	7.37
$q轴暂态开路时间 T'_{q0}/s$	0.820	0.819
d 轴次暂态开路时间 T''_{d0}/s	0.044	0.046
$q轴次暂态开路时间T''_{q0}/s$	0.092	0.078

3 DFIG风电场无功协调控制策略

根据上述分析,分布式调相机可以很好地实现无功及电压控制,但大规模风电经高压直流外送系统发生直流故障造成无功补偿容量较大时,考虑DFIG具有一定的无功补偿能力,所以有必要采取DFIG与分布式调相机进行无功协调控制。

以新疆某DFIG风电场为例,并网电压在0.9 (标幺值)~1.1(标幺值)时风机可保持正常运行, 将分布式调相机作为优先无功补偿设备,DFIG作 为备用补偿设备,通过检测并网点电压进行不同 无功补偿方式切换。为了使并网点电压不超过 1.1(标幺值),须保留一定电压裕度,因此设置当 并网点电压在0.95(标幺值)~1.05(标幺值)以内 时可由分布式调相机单独动作提供,在0.95(标 幺值)~1.05(标幺值)以外时DFIG协同调相机参 与无功调节控制电压。DFIG风电机组参与调节 时优先控制RSC,当风机定子无功达到满载,仍 无法满足无功需求时控制GSC参与无功调节。 具体无功功率协调控制框图和流程图如图3、图4 所示。



Fig.3 Structure diagram of reactive power coordination control



图4 无功协调控制流程图

Fig.4 Flow chart of reactive power coordination control DFIG风电场无功协调控制流程如下:

步骤1:实时检测风电场并网母线电压 U_{pec} , 与并网电压参考值 U_{pecef} 进行比较,计算电压偏差 $\Delta U_{pec} = |U_{pec} - U_{pecef}|;$

步骤 2:判断电压偏差 ΔU_{pee} 是否等于 0,当 $\Delta U_{pee} = 0$ 时, DFIG 与分布式调相机均不参与无功 调节, 反之, 进行步骤 3; 步骤3:判断电压偏差是否小于0.05,当小于 0.05时,为了保障风电场的经济运行,优先利用 分布式调相机进行无功补偿,协调控制信号置0, DFIG无功参考为零,工作于最大功率因数控制模 式,并返回步骤1,反之,进行步骤4;

步骤4:电压偏差大于0.05时,需要保障风电 场的安全运行,分布式调相机和DIFG均参与无 功补偿,协调控制信号S置-1或1(取决于电压降 落或升高),DFIG相应发出或吸收无功功率,优先 考虑定子侧进行无功补偿,当DFIG所需无功补 偿功率大于定子侧无功极限时,再进行网侧变流 器无功补偿。

4 仿真分析

本文采用 PSCAD/EMTDC 软件进行仿真分 析,高压直流系统采用 CIGRE 标准模型,系统额 定功率1000 MW,直流电压等级为500 kV,整流 站交流母线电压 345 kV。送端 DFIG 风电场采用 单机等效模型,单机容量 2.5 MW,总装机容量 500 MW,分布式调相机装设于风电场出口 35 kV 交流母线处(参数见表 1),机端额定电压 10.5 kV,仿真系统结构如图5所示。



4.1 换相失败故障仿真分析

设置 t=5 s时逆变侧交流母线发生单相接地 短路故障,引发系统发生换相失败,送端交流电 压呈现"先低后高"变化,风电机组承受低压和高 压穿越风险。

直流系统发生换相失败时,风电场并网点电 压变化情况如图 6a 所示,调相机和风电场无功功 率变化如图 6b 所示,在电压跌落阶段,分布式调 相机在 30 ms内发出接近 2 倍额定无功功率(约 91.4 Mvar)以改善电压,当检测到并网点电压低 于 0.95(标幺值)时,协调控制发出信号,DFIG风 电机组在故障发生约 10 ms后发出无功功率,阻 止电压持续跌落;在电压上升阶段,当检测到并 网点电压大于 0.95(标幺值)时风电场无功参考 变为0,防止因无功延时助增暂态过电压,当电压 大于1.05(标幺值)时风电场吸收无功功率;同时 分布式调相机进相运行,最大吸收无功约27.8 Mvar,有效抑制了暂态过电压;采用协调控制策 略后风电场并网电压最高为1.08(标幺值),约 37.8 kV,最低为0.87(标幺值),约30.45 kV,相较 无补偿方案分别提升了12%和19%,较仅分布式 调相机补偿提升了7%和9%。



4.2 直流闭锁故障仿真分析

设置 t=5 s时直流系统发生闭锁故障,故障发 生后直流线路输送有功功率瞬时降低至零,换流 站交流滤波器提供的无功功率在送端出现大量 无功盈余,约为 500 Mvar,使送端交流母线电压 迅速抬升,无补偿时换流站和风电场并网点电压 最高为1.35(标幺值),严重威胁系统安全运行, 为了使风电场电压控制在1.1(标幺值)以下,考 虑以下4种无功补偿对比方案。

方案一:DIFG风电场和调相机均不参与无功 补偿;

方案二: 仅换流站采用集中式调相机补偿, 容量为500 Mvar;

方案三:仅风电场采用分布式调相机补偿, 容量为500 Mvar;

方案四:换流站采用集中式调相机补偿,容量为300 Mvar,同时风电场采用分布式调相机补偿,容量为200 Mvar。

方案二、方案三、方案四均采用风电场无功 协调控制策略,图7a为直流闭锁后换流站母线电 压,图7b为风电场并网点电压。采用方案三时, 虽然风电场并网点暂态过电压最低,但换流站暂 态过电压达到1.23(标幺值)。相较于方案四,换 流站和并网点电压均低于1.1(标幺值),更好保 障系统的安全运行。图7c为采用方案四时直流 闭锁期间DFIG风电场和调相机吸收的无功功 率,故障发生约10 ms后并网点电压超过1.05(标 幺值),风电场进行紧急无功控制以改善系统电 压。通过不同补偿方案对比,直流系统发生闭锁 故障后,在风电场并网点配置一定容量分布式调 相机有利于风电场并网点电压恢复,提高了风电 场高压穿越能力,降低了风机脱网风险。





对比方案二、方案三、方案四仿真结果,方案 二更适用于传统机组电网,方案三更适用于分布 范围广的新能源配电网。但方案二和方案三在 大规模新能源经高压直流外送系统都存在一定 局限性。随着电力系统中新能源装机容量占比 不断升高,要求系统无功补偿速度更快、更加灵 活、可靠,方案二通过在换流站配置大容量集中 式调相机和新能源场端配置小容量分布式调相 机的无功补偿方式,可以更好地解决弱送端暂态 过电压的问题。

5 结论

随着新能源机组逐渐取代传统机组,风电经 高压直流外送系统故障时弱送端暂态过电压问 题严重。为了保障风电场稳定运行,提出了分布 式调相机与 DFIG 风电机组无功协调控制策略, 并通过仿真验证,可得出如下结论:

1)大规模新能源经高压直流外送系统中发 生换相失败、直流闭锁故障后,送端无功功率不 平衡是造成风机脱网的主要因素之一,新型分布 式调相机作为风电场的无功补偿设备,具有优异 的无功特性,能有效缓解故障后系统电压变化;

2)直流系统发生换相失败时,电压下降阶段 分布式调相机瞬间发出接近2倍容量无功功率抑 制电压跌落,所提策略有效降低风电场并网电压 波动,加快送端系统电压稳定恢复;

3) 直流闭锁故障期间, 换流站配置集中式调 相机可有效抑制换流站母线过电压, 但对风电场 并网点暂态过电压抑制效果有限, 在风电场并网 点配置部分容量的分布式调相机, 可以有效抑制 暂态过电压问题。

参考文献

 [1] 张鑫,刘飞,王世斌,等.提升特高压直流送端电网新能源消 纳水平措施[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(6): 135-141.

ZHANG Xin, LIU Fei, WANG Shibin, et al. Measures to improve the new energy consumption level of UHVDC sendingend power gird[J]. Journal of Power Systems and Automation, 2022,34(6):135-141.

- [2] 姚伟,丁剑,南佳俊,等.未来西部电网及可再生能源外送输 电技术发展方向研究[J].中国能源,2019,41(3):33-39.
 YAO Wei, DING Jian, NAN Jiajun, et al. Development direction of grid mode and transmission technologies adapting to large-scale renewable energy delivery of western China[J]. Energy of China, 2019,41(3):33-39.
- [3] 金一丁,于钊,李明节,等.新一代调相机与电力电子无功补 偿装置在特高压交直流电网中应用的比较[J].电网技术, 2018,42(7):2095-2102.

JIN Yiding, YU Zhao, LI Mingjie, et al. Comparison of new generation synchronous condenser and power electronic reactivepower compensation devices in application in UHVDC/AC grid [J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2095–2102.

[4] 王康,李子恒,杨超然,等.面向大型新能源基地小干扰稳定
 性提升的调相机选址方法[J].电力系统自动化,2022,46
 (4):66-74.

WANG Kang, LI Ziheng, YANG Chaoran, et al. Optimal configuration of synchronous condensers to improve the small signal stability of multiple renewable-energy grid-connected converters system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46 (4):66–74.

[5] 赵晟凯,何秀强,吕晨,等.孤岛双馈风电场接入LCC-HVDC 82

的黑启动与协同控制策略[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37 (7):87-96,135.

ZHAO Shengkai, HE Xiuqiang, LÜ Chen, et al. Black start-up and coordinated control strategy of standalone doubly-fed wind farms connected to LCC-HVDC[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(7):87–96, 135.

[6] 沙江波,杨硕,郭春义,等.同步调相机对分层接入特高压直流输电系统的换相失败抑制作用研究[J].电网技术,2019,43(10):3552-3561.

SHA Jiangbo, YANG Shuo, GUO Chunyi, et al. Study on suppression effect of synchronous condenser on commutation failure of UHVDC system under hierarchical connection mode[J]. Power System Technology, 2019, 43(10):3552–3561.

- [7] 王雅婷,张一驰,周勤勇,等.新一代大容量调相机在电网中的应用研究[J].电网技术,2017,41(1):22-28.
 WANG Yating, ZHANG Yichi, ZHOU Qinyong, et al. Study on application of new generation large capacity synchronous condenser in power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41 (1):22-28.
- [8] 索之闻,刘建琴,蒋维勇,等.大规模新能源直流外送系统调相机配置研究[J]. 电力自动化设备,2019,39(9):124-129.
 SUO Zhiwen, LIU Jianqin, JIANG Weiyong, et al. Research on synchronous condenser configuration of large-scale renewable energy DC transmission system [J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(9):124-129.
- [9] 吴倩,薄鑫,张汀荃,等.SVC附加闭锁控制提高双馈风电场 高电压穿越研究[J].电力工程技术,2019,38(2):38-43.
 WU Qian, BO Xin, ZHANG Tingquan, et al. Additional locking control of SVC improving high voltage ride through of DFIG based wind farm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019,38(2):38-43.
- [10] 郑凯凯,陈洁,王小军,等.基于无功功率分解的DFIG与 STATCOM的功率协调控制[J].电网与清洁能源,2021,37 (6):1-8,17.

ZHENG Kaikai, CHEN Jie, WANG Xiaojun, et al. Power coordinated control of DFIG and STATCOM based on reactive power decomposition[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37 (6):1–8, 17.

- [11] HE S, CHENG J, YUAN Z, et al. New research progress of large capacity new synchronous condenser[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 770 (1) : 012057.
- [12] 赵学明,李永丽,孙广宇,等.换相失败对含风电场的交直流
 混联系统送端过电压的影响[J].高电压技术,2019,45(11):
 3666-3673.

ZHAO Xueming, LI Yongli, SUN Guangyu, et al. Effect of commutation failure on the overvoltage on rectifier station in AC/DC hybrid power system with wind farms[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3666–3673.

[13] 朱凌志,曲立楠,刘纯,等.新能源发电集群的改进等效短路
 比计算方法[J].电力系统自动化,2021,45(22):74-82.
 (下转第96页)

基于SMOTE-SSA-CNN的开关柜故障诊断方法

张玮

(国网甘南供电公司,甘肃甘南藏族自治州 747000)

摘要:开关柜多源监测数据包含丰富的设备运行状态信息,对其进行分析可实现开关柜故障诊断。提出 一种基于SMOTE-SSA-CNN的开关柜故障诊断方法。首先,以开关柜电压、电流和温湿度等监测数据为基础, 采用合成少数类样本过采样技术(SMOTE)算法对原始数据集进行样本扩充,解决原始数据集中正负样本严重 失衡的问题;然后引入麻雀搜索算法(SSA)对卷积神经网络(CNN)的卷积核大小与数量、全连接层神经元数 量、学习率等超参数进行优化,提高模型故障诊断结果的准确率;最后,通过算例分析对建立的SMOTE-SSA-CNN模型性能进行评估,验证了所提方法对开关柜故障诊断的有效性,且与传统故障诊断方法相比,所提方法 的收敛性较好,精度较高。

关键词:开关柜;多源监测数据;合成少数类样本过采样技术算法;麻雀搜索算法;卷积神经网络中图分类号:TM591 文献标识码:A DOI:10.19457/j.1001-2095.dqcd25533

Fault Diagnosis Method for Switchgear Based on SMOTE-SSA-CNN

ZHANG Wei

(State Grid Gannan Power Supply Company, Gannan Tibetan Autonomous Prefecture 747000, Gansu, China)

Abstract: The multi-source monitoring data of switchgear contains rich equipment operating status information, and analyzing it can achieve switchgear fault diagnosis. A fault diagnosis method for switchgear based on SMOTE-SSA-CNN was proposed. Firstly, based on monitoring data such as switchgear voltage, current, and temperature and humidity, the synthetic minority over-sampling technique(SMOTE) algorithm was used to expand the original dataset, solving the problem of severe imbalance between positive and negative samples in the original dataset. Then, the sparrow search algorithm (SSA) was introduced to optimize the hyperparameters of convolutional neural networks (CNN), such as the size and number of convolutional kernels, the number of fully connected layer neurons, and the learning rate, in order to improve the accuracy of the model's fault diagnosis results. Finally, the performance of the established SMOTE-SSA-CNN model was evaluated through example analysis, verifying the effectiveness of the proposed method for switchgear fault diagnosis. Compared with traditional fault diagnosis methods, the proposed method has better convergence and higher accuracy.

Key words: switchgear; multi source monitoring data; synthetic minority over-sampling technique(SMOTE) algorithm; sparrow search algorithm(SSA); convolutional neural network(CNN)

高压开关柜作为电网的核心设备之一,其健 康状况对电力系统的安全稳定运行至关重要^[1-3]。 但是开关柜的机械结构和运行环境复杂,在长期 运行过程中存在表面积污、受潮、绝缘老化等问 题,容易引发局部放电、温升、机械等故障^[4]。因 此,有必要建立高效的开关柜故障诊断模型,及 时准确地掌握开关柜的运行状态,进而为设备运 维检修计划的制定提供参考。

随着人工智能的发展, BP(back propagation)

神经网络、支持向量机(support vector machine, SVM)、卷积神经网络(convolutional neural network,CNN)等机器学习方法在近年被广泛应用于 开关柜故障诊断中。文献[5-6]建立了基于BP神 经网络的故障诊断模型,将开关柜超声波信号作 为输入,实现了开关柜局部放电故障的识别和定 位。文献[7]采用降半梯形云模型提取开关柜电 压、电流、温湿度等监测数据的特征,并借助模糊 支持向量机实现了开关柜不同故障的诊断。文

基金项目:甘肃省重点研发计划(21YF5GA159)

作者简介:张玮(1989—),男,本科,高级工程师,Email:15101460625@136.com

献[8]利用多波段光学传感器得到开关柜沿面放 电的光谱比率,结合模糊聚类算法和支持向量 机,实现对开关柜放电程度的判别;文献[9-10]构 建了基于卷积神经网络的分类模型,将开关柜超 声波和地电波数据的时频谱图作为输入特征值, 实现了开关柜局部放电故障的识别。现有研究 结果表明基于开关柜的多源监测数据和机器学 习算法,可实现开关柜不同故障的识别。然而实 际运行的开关柜故障是小概率事件,导致原始数 据集的正负样本比例严重失衡,同时现有方法通 过人工经验设置分类模型的超参数,严重影响了 机器学习分类模型的准确性和可靠性。

基于此,本文以开关柜多源监测数据为基础,提出了一种基于SMOTE-SSA-CNN的开关柜 故障诊断方法。首先利用合成少数类样本过采 样算法对多源监测数据集中的少数类故障样本 进行扩充,降低原始数据集的不平衡度;然后基 于均衡数据集,构建卷积神经网络分类模型,并 通过麻雀搜索算法对卷积神经网络的卷积核大 小与数量、全连接层神经元数量、学习率进行优 化,避免卷积神经网络模型超参数设置的主观 性;最后通过算例验证了所提方法的有效性。

1 基于SMOTE算法均衡数据集

数量充足且正负样本分布均衡的样本集是 确保深度学习分类模型准确率和泛化能力的基 本前提。然而在实际运行过程中,开关柜故障为 小概率事件,加上完善的保护措施,导致监测数 据集中故障样本匮乏且正负样本比例失衡。采 用基于深度学习算法的分类模型对正负样本失 衡的数据集进行分析时,故障识别结果偏向于多 数类,而少数类的识别准确率偏低^[11-12]。

合成少数类样本过采样技术(synthetic minority over-sampling technique, SMOTE)算法是一 种随机过采样的改进方法,该方法基于非均衡数 据集中少数类样本,通过线性随机插值的方式得 到新样本^[13-14],实现原始数据集的均衡化处理,进 而提高深度学习分类模型的精度和泛化能力。 图1为少数类样本扩充基本原理图。具体步骤 如下:

1)初始化开关柜原始数据中少数类样本集 $S_{\min,n} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}_o$

2)采用K近邻算法得到开关柜少数类样本 x_n 的K个近邻样本 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_k\}_o$

3)随机选取 K个近邻样本 Y的 m(m < K)个 样本 y_i(i = 1,2,...,m)。

4)采用随机线性插值的方式对样本 x_a和 y_i 进行处理,得到具有相邻样本特征的新样本,实 现原始数据集的均衡化。基于随机线性插值的 样本合成公式为

 $z_i = x_n + (x_n - y_i) \cdot \text{rand}(0,1)$ (1) 式中: z_i 为新生成的少数类样本; rand(0,1)为在 (0,1)范围内的一个随机数。



图 1 SMOTE 算法扩充少数类样本 Fig.1 SMOTE algorithm expands minority class samples

2 基于均衡样本的 SSA-CNN 开关 柜故障诊断模型

2.1 开关柜特征参量

根据《电网设备状态检测技术应用典型案 例》¹⁵¹及相关资料,开关柜的机械性能和电气性能 主要由母线、电缆和断路器的性能决定,因此,将 开关柜分为母线、电缆和断路器3部分。当开关 柜在运行期间出现表面积污、受潮、绝缘老化等 问题时,易发生局部放电故障,从而导致开关柜 内部电气参数产生变化;长期过负荷和接触不良 会使开关柜发热,进而可能引发温升故障;随着 投运年限和开断次数的增加,断路器的机械性能 也会逐渐下降。因此,为了能够对开关柜局部放 电、温升、机械等故障进行全面诊断,本文选取母 线室、电缆室、断路器室3部分的12种状态量作 为多源监测数据,具体如表1所示。

2.2 卷积神经网络

开关柜多源监测数据具有模糊性较强、特征 间差异较小等特点,采用BP神经网络、支持向量 机等传统分类模型对开关柜故障进行识别时,易 出现网络运算效率低、参数调优复杂以及运算结 果不收敛等问题。为了深入分析开关柜多源监 测数据和故障类型之间的关联性,采用具有强大

	表1 开关柜监	则状态量
Tab.1	uantity of switchgear	
位置	状态量	获取方式
	三相电压	断路器测量
四代宏	母排温度	泪由住咸鬼
马线至	母线室温度	価反何恐奋
	母线室湿度	湿度传感器
	三相电流	断路器测量
由桃宫	电缆接头温度	泪由比咸思
电现至	电缆室温度	溫度传感帝
	电缆室湿度	湿度传感器
	分断电压	
此时限会	分断电流	此政現別是
则始侨主	故障跳闸延时	哟 跗 奋 侧 里
	接地电流	

特征表征能力的卷积神经网络分类模型代替传统分类模型,充分挖掘不同故障类型下特征之间的差异性,高效快速地建立开关柜多源数据与故障类型之间的映射关系,以提升开关柜故障诊断的准确性和可靠性。

CNN 是一种典型前馈型深度学习网络,其结构一般由输入层、输出层以及多个卷积层、池化层和全连接层组成,可实现局部特征提取、区域 共享权值以及数据池化^[16-17]。相较于浅层神经网络,多隐含层结构的CNN模型能够自适应地挖掘 数据深层特征,具有运算速率快、避免训练陷入 局部极值等优点。CNN的基本结构如图2所示。





一维CNN用于处理一维数组,卷积核沿一个 方向滑动,符合开关柜多源监测数据的输入特征。一维CNN的总体数学模型表达式为

 $x_{output} = f_{Softmax} \{ f_{fc} \{ f_{pooling} [f_{conv}(x_{input})] \} \}$ (2) 式中: x_{input} 为输入特征集; x_{output} 为输出的分类结 果; $f_{conv}(\cdot)$ 为卷积层计算,包括卷积运算与非线性 激活; $f_{pooling}(\cdot)$ 为池化层计算; $f_{fc}(\cdot)$ 为全连接层计 算; $f_{Softmax}(\cdot)$ 为通过函数计算得到的输出结果。

由于CNN模型的卷积核大小与数量、全连接 层神经元数量、学习率等超参数通常根据人工经 验设定,导致模型的输出结果准确性较差。针对 人工经验选取CNN超参数难以构建最优网络问 题,本文通过麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)优化CNN模型超参数,进而提升模型的准确性和可靠性。

2.3 基于SSA的CNN模型超参数优化

麻雀搜索算法通过分析麻雀的觅食行为,构 建出具有预警机制的发现者--跟随者的智能优化 模型。与遗传算法(genetic algorithm,GA)、粒子 群优化(particle swarm optimization,PSO)算法等 智能优化方法相比较,麻雀搜索算法具有收敛速 度快、全局搜索能力强等优点^[18-19]。SSA的基本 原理如下:

假设存在n只麻雀构成的种群X:

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_1^2 & \cdots & x_1^d \\ x_2^1 & x_2^2 & \cdots & x_2^d \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n^1 & x_n^2 & \cdots & x_n^d \end{bmatrix}$$
(3)

式中:d为问题维度。

则麻雀种群X中所有麻雀的适应度可表示为

$$\boldsymbol{F}_{x} = \begin{bmatrix} f([x_{1}^{1} \ x_{1}^{2} \ \cdots \ x_{1}^{d}]) \\ f([x_{2}^{1} \ x_{2}^{2} \ \cdots \ x_{2}^{d}]) \\ \vdots \ \vdots \ \ddots \ \vdots \\ f([x_{n}^{1} \ x_{n}^{2} \ \cdots \ x_{n}^{d}]) \end{bmatrix}$$
(4)

式中:f([x^d_k])为麻雀个体适应度。

依据麻雀觅食行为,麻雀种类可分为3类:发现者、跟随者、警戒者。发现者是麻雀种群中适应度较小的麻雀个体,其主要作用是给麻雀种群寻觅食物,并且将觅食方向提供给跟随者。也就是说,麻雀种群中发现者的觅食范围要大于跟随者。麻雀种群中发现者的位置更新公式为

$$X_{kj}^{t+1} = \begin{cases} X_{kj} \cdot \exp(-\frac{k}{\alpha \cdot t_{\max}}) & R_2 < d \\ X_{kj} + Q \cdot L & R_2 \ge D \end{cases}$$
(5)

式中:t, t_{max} 分别为迭代次数和最大迭代次数; $X_{kj}(j = 1,2,...,d)$ 为第k个麻雀的位置处于第j维; α 为[0,1]之间的随机数; R_2 为预警值, $R_2 \in [0,1]$; L为1×d的单位矩阵;D为安全值, $D \in [0.5,1]$ 。 跟随者的位置更新公式可表示为

$$X_{kj}^{t+1} = \begin{cases} Q \cdot \exp(X_{w}^{t} - X_{kj}^{t}) & k > n/2 \\ X_{p}^{t+1} + \left| X_{kj} - X_{p}^{t+1} \right| \cdot A \cdot L & k \le n/2 \end{cases}$$
(6)

式中: X_w , X_p 分别为更新后麻雀种群的最差位置 和发现者的最优位置;A为1×d维的随机矩阵, 并且有 $A^+ = A^T(AA^T) - 1$,矩阵A内所有元素是1 或-1的随机数。 麻雀种群中警戒者位置更新公式为

$$X_{kj}^{t+1} = \begin{cases} X_{b}^{t} + \beta \cdot |X_{kj}^{t} - X_{b}^{t}| & f_{k} > f_{g} \\ X_{kj}^{t} + K \cdot \left(\frac{|X_{kj}^{t} - X_{w}^{t}|}{(f_{k} - f_{w}) + \varepsilon}\right) & f_{k} = f_{g} \end{cases}$$
(7)

式中: X_b 为更新后麻雀种族的最优位置; f_b 为更新 麻雀个体适应度; f_s, f_w 分别为更新后麻雀种群最 差和最优适应度; β, K 均为随机数,其中 β 服从正 态分布, $K \in [-1,1]$ 。

本文将 CNN 分类模型的卷积核大小与数量、 全连接层神经元个数、学习速率等超参数作为麻 雀个体,并且以 CNN 模型输出结果准确率为适应 度函数,采用 SSA 对模型超参数进行优化。满足 下式时,最大适应度函数对应的属性值就是 CNN 分类模型的优化超参数。

$$\max F = \max \frac{n_{i \otimes m k \otimes z}}{n_{i \neq k \otimes i \otimes j}}$$
(8)

2.4 基于 SMOTE-SSA-CNN 的开关柜故障诊 断模型

基于 SMOTE-SSA-CNN 的开关柜故障诊断 流程如图 3 所示,主要包括 3 个部分,即少数类样 本扩充、CNN 分类模型超参数优化、开关柜故障 诊断。具体步骤如下:



图 3 基于 SMOTE-SSA-CNN 的开关柜故障诊断流程 Fig.3 Fault diagnosis process for switchgear based on SMOTE-SSA-CNN

1)少数类样本扩充。采用SMOTE算法分别 对原始数据集中的开关柜局部放电、温升和机械 故障数据进行样本扩充,重新组成均衡化数据 集,并将其划分为训练集与测试集。

2)SSA优化 CNN 超参数。将 CNN 分类模型 的超参数作为 SSA 的麻雀个体,分类模型准确率 作为麻雀个体的适应度函数,计算适应度值并更 新种群,直到满足最大迭代次数,得到 CNN 的最 优超参数。

3)变压器故障诊断。基于SMOTE算法得到 的扩充数据集,结合SSA算法寻优得到的最优超 参数,搭建CNN模型进行开关柜故障诊断。

2.5 评价指标

为评估所提方法的有效性,引入准确率 η_{A} 、 查准率 η_{P} 、查全率 η_{R} 和Kappa系数 η_{K} 作为故障诊 断模型的评价指标,数学表达式为

 η

$$A_{A} = n/N \tag{9}$$

$$\eta_{\rm P} = \frac{n_{\rm T}}{n_{\rm P}} \tag{10}$$

$$\eta_{\rm R} = \frac{n_{\rm T}}{n_{\rm R}} \tag{11}$$

$$\eta_{\rm K} = \frac{\eta_{\rm A} - \sum_{i=1}^{4} n_{\rm Ri} n_{\rm Pi} / N^2}{1 - \sum_{i=1}^{4} n_{\rm Ri} n_{\rm Pi} / N^2}$$
(12)

式中:n为诊断的故障类型与实际故障类型相同 的样本数;N为开关柜数据集的所有样本数量;n_T 为开关柜某类故障诊断结果正确的样本数量;n_p 为预测为该类故障的样本数;n_R为该类故障样本 数;i为开关柜的4种运行状态,i = 1,2,3,4。

准确率 η_A和 Kappa 系数 η_K是 SSA-CNN 分类 模型对开关柜故障诊断能力的全局指标,数值越 大说明分类模型的性能越好; η_P为分类模型对一 种故障出现误判的评价指标,数值越大说明分类 模型的误判率越低; η_R为分类模型对某种故障出 现漏判的评价指标,数值越大说明分类模型的漏 判率越低。

3 算例验证

本文以西北某地区电力部门10kV高压开关 柜为研究对象,选取其历史多源监测数据共计 405组作为样本数据集,并且按照8:2的比例将 原始数据集划分为测试集和训练集,测试集去除 数据标签,训练集保留数据标签,具体样本分布 如表2所示。依据文献[15]和相关运维经验,将开 关柜运行状态划分为:正常运行、局部放电故障、 温升故障和机械故障4类。

表2 样本分布情况 Tab.2 Sample data distribution

故障类型	故障标签	训练集	测试集	总计	占总样本 数比重/%
正常运行	1	200	50	250	61.73
局部放电	2	60	15	75	18.52
温升故障	3	48	12	60	14.81
机械故障	4	16	4	20	4.94

3.1 样本均衡化处理

由表2可知,开关柜正常运行样本数为250 组,占总样本数的61.73%,而故障样本数为155 组,占总样本数的38.27%,其中机械故障样本数 仅为20组,占总样本数的4.94%,开关柜原始数 据集的正负样本比例严重失衡,从而会影响后续 SSA-CNN模型的故障诊断准确性。因此,采用 SMOTE算法分别对局部放电、温升和机械故障的 样本数据进行扩充,使得开关柜每种运行状态的 样本数量均达到250组。

为了进一步说明本文所提的少数类样本扩充方法对于提高开关柜故障识别准确率的可行性,分别采用随机采样法、SMOTE算法合成原始数据集的少数类样本,并将原始数据集、经样本扩充后的数据集作为SSA-CNN模型的输入,对模型输出结果进行对比,结果如表3所示。

表3 不同扩充算法的识别结果

Tab.3 Fault diagnosis results of different expansion algorithms

扩充方法	准确率/%	Kappa系数
未均衡化	71.51	0.68
随机采样法	90.47	0.89
SMOTE	97.50	0.96

由表3可知,原始非均衡样本数据作为训练 集时,基于SSA-CNN的故障诊断模型准确率仅 为71.51%,Kappa系数为0.68,开关柜故障诊断精 度较低。通过随机采样法、SMOTE算法对原始数 据集的少数类样本进行扩充后,开关柜故障诊断 模型的准确度分别提升了26.51%和36.34%。结 果表明本文所提的基于SMOTE算法的少数类样 本扩充方法,能够有效解决开关柜原始数据集中 正负样本严重失衡的问题,显著提升故障诊断模 型的准确性。

3.2 开关柜故障诊断

根据人工经验搭建基础CNN分类模型,具体

设置如下:卷积层采用2层,每层卷积核大小分别为3×3,2×2,数量分别为32和64;每层卷积层后设置池化层、批标准化层,池化核的大小为2×2,步长为1,填充方式为Same;激活函数采用ReLU函数;全连接层采用2层,神经元数量分别为64和32;经过Softmax函数激活,输出量为4;优化器为Adam;学习率为0.001。而对于SSA-CNN分类模型的搭建,卷积层、全连接层、优化器等均与基础CNN模型相同,但卷积核大小与数量、全连接层的神经元个数、初始学习率等超参数则采用SSA优化,SSA初始参数设置如表4所示。

表4 SSA算法初始参数

Tab.4 Initial parameters of SSA algorithm

参数名称	参数值	参数名称	参数值
种群数	15	预警者	0.2
迭代次数	70	安全值	0.6
发现者	0.8	优化维度	300

SSA-CNN分类模型对开关柜故障诊断结果 如图4所示,混淆矩阵如图5所示,评价指标结果 如表5所示。



Fig.4 Diagnosis results of switchgear faults

いいしゃ 住い日 いろんに	174
加拉生泥酒扣	124

					-	
正常	运行	50 25.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	查准率 100% 0.0%
局部	放电	0 0.0%	50 25.0%	0 0.0%	2 1.0%	查准率 96.2% 3.8%
澎 坡 憲 法	故障	0 0.0%	0 0.0%	49 24.5%	2 1.0%	查准率 96.1% 3.9%
麏 机械	故障	0 0.0%	0 0.0%	1 0.5%	46 23.0%	查准率 97.9% 2.1%
		查全率 100% 0.0%	查全率 100% 0.0%	查全率 98% 2.0%	查全率 92% 8.0%	准确率 97.5% 2.5%
		正常运行	局部放电 预	温升故障 [测故障类]	机械故障 别	

图5 开关柜故障诊断结果混淆矩阵

Fig. 5 Confusion matrix of switchgear fault diagnosis results

表5 SSA-CNN模型的评价指标结果

Tab.5 Evaluation index results of SSA-CIVIN mode	Tab.5	Evaluation	index	results	of SS	SA-CNN	model
--	-------	------------	-------	---------	-------	--------	-------

	评价指标	
准确率/%	查准率/%	查全率/%
	100	100
07.5	96.2	100
97.5	96.1	98
	97.9	92
	准确率/%	评价指标 准确率/% 查准率/% 100 96.2 97.5 96.1 97.9 97.9

分析图4与表5可知,本文所提的基于SSA-CNN的故障诊断模型对开关柜4种运行状态的查 准率均大于96%,查全率均大于92%,总体故障 诊断准确率达到了97.5%。结果表明基于SSA-CNN的开关柜分类模型的故障诊断总体性能好, 故障诊断灵敏度和可信度高。

3.3 不同模型诊断结果对比

为了验证SSA-CNN分类模型的优越性,将 均衡化样本数据集作为输入量,采用BP神经网 络(BPNN),SVM,CNN,PSO-CNN,GA-CNN等分 类模型进行开关柜故障诊断,并与本文所提模型 的输出结果进行对比。开关柜故障识别结果如 表6所示。

表6 不同模型的输出结果

Tab.6	Output	results	of	different	models
-------	--------	---------	----	-----------	--------

模型	准确率/%	Kappa系数	收敛次数
BPNN	84.3	0.81	
SVM	83.6	0.79	
CNN	91.5	0.88	
PSO-CNN	94.3	0.91	47
GA-CNN	92.7	0.90	31
SSA-CNN	97.5	0.95	24

由表6可知,BP神经网络、支持向量机等传统分类模型的准确率低于90%,而具有多隐含层结构的CNN模型,能够自适应挖掘多源监测数据的深层特征,其故障识别精度达到91.5%。同时,对于SSA-CNN等改进CNN模型,由于优化了超参数,因此相比基础CNN模型的开关柜故障诊断准确率都得到了不同程度的提高。

横向比较 PSO-CNN, GA-CNN, SSA-CNN 可知, 相比于其他 2 种分类模型, SSA-CNN 模型在故障诊断精度和运算速率上都具备一定的优势。 从故障诊断精度上看, SSA-CNN 模型的准确率高达 97.5%, 明显高于其他 2 种模型。从运算速率 上看, SSA-CNN 模型收敛至最高准确度所需的迭 代次数为 24, 低于 PSO-CNN 模型和 GA-CNN 模 88 型。算例结果表明,所提方法能够有效识别开关 柜局部放电故障、温升故障和机械故障,并且与 传统故障诊断方法相比,所提方法的收敛性较 好,精度较高。

4 结论

本文提出了一种基于SMOTE-SSA-CNN的 开关柜故障诊断方法,并通过算例验证了所提方 法的有效性和优越性。得到的结论如下:

1)针对开关柜原始数据集中正负样本严重 失衡的问题,采用SMOTE算法生成少数类样本 数据,有效降低了原始数据集的不平衡度,使故 障诊断结果更加准确。

2)针对人工经验选取 CNN 超参数难以构建 最优网络问题,采用 SSA 算法优化 CNN 模型的学 习率、卷积核大小与数量、全连接层神经元数量 等超参数,算例结果表明改进后的方法收敛性更 好,全局搜索能力更强,故障诊断准确率更高。

3)与传统故障诊断模型相比,本文提出的基 于 SMOTE-SSA-CNN 的开关柜故障诊断模型具 有更强的故障识别性能,可以满足实际运维检修 工作需要,能够在缺少开关柜故障样本数量时, 为运维工作人员及时准确地掌握开关柜运行状 态提供参考。

参考文献

- 贺建明,刘坚钢,易非凡,等.开关柜绝缘故障仿真与检测系统研究[J].高压电器,2022,58(3):23-28.
 HE Jianming,LIU Jiangang,YI Feifan, et al. Research on simulation and detection system of insulation fault of switchgear cabinet[J]. High Voltage Apparatus,2022,58(3):23-28.
- [2] 亢超群,李二霞,盛万兴,等.基于多源信息融合的配电真空 开关柜动态状态评价研究[J].高压电器,2017,53(3):235-241.

KANG Chaoqun, LI Erxia, SHENG Wanxing, et al. Dynamic condition assessment for distribution vacuum switch cabinets based on multi-source information fusion[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3):235–241.

- [3] 黄俊宁,于群.基于多源数据融合与设备相似性的高压开关 柜评价模型[J].高压电器,2023,59(2):198-204.
 HUANG Junning, YU Qun. Evaluation model high voltage switch cabinet based on multi-source data fusion and equipment similarity[J]. High Voltage Apparatus,2023,59(2):198-204.
- [4] 徐卫东,聂一雄,陈云龙,等.固体绝缘开关柜局部放电严重 程度评估方法[J].高压电器,2019,55(1):27-33.
 XU Weidong, NIE Yixiong, CHEN Yunlong, et al. Evaluation

method of severity of partial discharge in solid insulated switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(1):27-33.

- [5] 李江涛,孙义,李擎宇.大电流开关柜梅花触头热缺陷评估 算法研究[J]. 高压电器,2020,56(11):127-129.
 LI Jiangtao,SUN Yi,LI Qingyu. Research on thermal defect assessment algorithms for tulip contacts of high current switchgear[J]. High Voltage Apparatus,2020,56(11):127-129.
- [6] 袁港.基于超声波的高压开关柜局部放电检测方法研究
 [D]. 沈阳:沈阳农业大学,2022.
 YUAN Gang. Research on partial discharge detection method for high-voltage switchgear based on ultrasoun[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University,2022.
- [7] 辛业春,崔金栋,周川,等.基于多变量多尺度云样本熵和模 糊支持向量机的开关柜故障分类[J].电网技术,2016,40 (11):3597-3603.

XIN Yechun, CUI Jindong, ZHOU Chuan, et al. Fault classification for smart switchgear based on multivariate multiscale cloud sample entropy and fuzzy support vector machine[J]. Power System Technology, 2016, 40(11):3597–3603.

 [8] 任明,王玥,关浩斌,等.沿面放电光脉冲发展特征与临界击 穿判据研究[J].中国电机工程学报,2024,44(10):4123-4134.

REN Ming, WANG Yue, GUAN Haobin, et al. Development characteristics and critical breakdown criterion of surface discharge light pulse[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(10): 4123-4134.

- [9] 黄雪莜,熊俊,张宇,等.基于残差卷积神经网络的开关柜局 部放电模式识别[J].中国电力,2021,54(2):44-51.
 HUANG Xueyou, XIONG Jun, ZHANG Yu, et al. Partial discharge pattern recognition of switchgear based on residual convolutional neural network[J]. Eelctric Power, 2021, 54(2):44-51.
- [10] 朱正国,何斌斌,胡冉,等. 基于卷积神经网络的开关柜局部 放电监测[J]. 电网与清洁能源,2017,33(3):17-22.
 ZHU Zhengguo, HE Binbin, HU Ran, et al. Switch-gear partial discharge detection based on convolutional neural network[J].
 Power System and Clean Energy,2017,33(3):17-22.
- [11] 严英杰,盛戈皞,陈玉峰,等.基于大数据分析的输变电设备 状态数据异常检测方法[J].中国电机工程学报,2015,35
 (1):52-59.

YAN Yingjie, SHENG Gehao, CHEN Yufeng, et al. An method for anomaly detection of state information of power equipment based on big data analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1):52-59.

[12] 廖瑞金,王有元,刘航,等.输变电设备状态评估方法的研究 现状[J].高电压技术,2018,44(11):3454-3464.

LIAO Ruijin, WANG Youyuan, LIU Hang et al. Research status of condition assessment method for power equipment[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3454–3464.

[13] 刘云鹏,和家慧,许自强,等.基于 SVM SMOTE 的电力变压 器故障样本均衡化方法[J].高电压技术,2020,46(7):2522-2529.

LIU Yunpeng, HE Jiahui, XU Ziqiang, et al. Equalization method of power transformer fault sample based on SVM SMOTE[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2522–2529.

[14] 丛伟,胡亮亮,孙世军,等.基于改进深度降噪自编码网络的
 电网气象防灾方法[J].电力系统自动化,2019,43(2):42-49.

CONG Wei, HU Liangliang, SUN Shijun, et al. Meteorological disaster prevention method for power grid based on improved stacked denoising auto-encoder network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2):42–49.

- [15] 国家电网公司运维检修部.电网设备状态检测技术应用典型案例(2011—2013年)[M].北京:中国电力出版社,2014. State Grid Corporation of China Operations and Maintenance Department. Typical cases of application of state detection technology for power grid equipment (2011—2013)[M]. Beijing: China Electric Power Press,2014.
- [16] 周飞燕,金林鹏,董军.卷积神经网络研究综述[J]. 计算机学报,2017,40(6):1229-1251.
 ZHOU Feiyan, JIN Linpeng, DONG Jun. Review of convolution neural network[J]. Chinese Journal of Computers, 2017,40(6): 1229-1251.
- [17] 张重远,罗世豪,岳浩天,等. 基于 Mel 时频谱-卷积神经网络的变压器铁芯声纹模式识别方法[J]. 高电压技术,2020,46(2):413-423.
 ZHANG Zhongyuan, LUO Shihao, YUE Haotian, et al. Pattern

recognition of acoustic signals of transformer core based on Melspectrum and CNN[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 413–423.

[18] 刘展程,王爽,唐波.基于 SSA-BiGRU-Attention 模型的变
 压器油中溶解气体含量预测[J].高电压技术,2022,48(8):
 2972-2981.

LIU Zhancheng, WANG Shuang, TANG Bo. Prediction of dissolved gas content in transformer oil based on SSA-BiGRU-Attention model[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48 (8) : 2972-2981.

[19] 王艳,李伟,赵洪山,等.基于油中溶解气体分析的DBN-SS-AELM变压器故障诊断方法[J].电力系统保护与控制, 2023,51(4):32-42.

WANG Yan, LI Wei, ZHAO Hongshan, et al. Transformer DGA fault diagnosis method based on DBN-SSAELM[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4):32-42.

收稿日期:2023-12-01 修改稿日期:2023-12-28

单相四象限整流器故障诊断方法研究

李伟1,2,李颖奇1,候雷浩3,李军鹏3,刘德剑3

(1.中国铁道科学研究院集团有限公司 机车车辆研究所,北京 100081;

2. 动车组和机车牵引与控制国家重点实验室,北京 100081;

3.北京纵横机电科技有限公司,北京100094)

摘要:对四象限整流器主电路故障以及相应的影响进行分析和总结,重点针对中间直流环节预充电过程 中的电压和电流参数方程进行分析,提出变流器输入电流和中间直流环节电压的估算方法。将估算参数与实 际检测结果进行对比,利用不同故障点在预充电过程的表现可以进行相应的故障诊断。通过仿真和试验对不 同故障点的工况进行模拟和分析,结果表明提出的故障诊断方法有效可行。

关键词:四象限整流器;预充电;中间直流环节;故障诊断

中图分类号:TM28 文献标识码:A DOI:10.19457/j.1001-2095.dqcd24603

Fault Detection Method Research of Single-phase Four-quadrant Rectifier

LI Wei^{1,2}, LI Yingqi¹, HOU Leihao³, LI Junpeng³, LIU Dejian³

(1.Locomotive and Car Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China; 2.State Key Laboratory for Traction and Control System of EMU and Locomotive, Beijing 100081, China; 3.Beijing Zongheng Electro-mechanical Technology Co., Ltd., Beijing 100094, China)

Abstract: The main circuit faults of the four-quadrant rectifier and the corresponding influences were analyzed and summarized, focusing on the analysis of the voltage and current parameter equations in the pre-charging process of the intermediate DC link, and the estimation method of the converter input current and the intermediate DC link voltage was proposed. The estimated parameters were compared with the actual detection results, and the corresponding fault detection can be carried out by using the performance of different faults in the pre-charging process. Through simulation and experiment, different faults were simulated and analyzed, and the results show that the fault detection method proposed is effective and feasible.

Key words: four-quadrant rectifier; pre-charging; intermediate DC link; fault detection

单相四象限整流器是牵引传动变流系统的 重要组成部分,其性能不仅直接关系到牵引变流 器对供电接触网的影响,而且与电机侧逆变器的 运行性能密切相关^[1-3]。正因如此,四象限整流器 一旦出现故障通常将导致变流器停机,导致牵引 动力的丢失,从而影响整车的牵引能力。此时如 何快速准确判断其故障点是非常重要的。

本文以两电平四象限整流器为基础,对其故 障点以及相应的影响进行总结,并对其主电路进 行分析。在此基础上重点针对预充电阶段的电 压、电流特征进行理论分析,针对不同故障点在 此阶段的表现进行相应的故障诊断,从而能够准 确地定位相应的故障。故障的准确定位可减少 变流器的运用维护时间,同时通过对电压、电流 的检查亦可以判断相关部件的特性参数变化,为 变流器的健康管理提供依据。

通过仿真和试验的方法对不同故障点的测 量参数进行分析,表明本文提出的故障诊断方法 有效可行,可用于四象限整流器故障定位,能够 为相关故障诊断和健康管理提供支持。

1 主电路故障分析

图1是四象限整流器主电路^[4-5],从图中可以 看出四象限整流器主要包括三个环节:交流输

基金项目:中国铁道科学研究院集团有限公司科研基金项目(2021YJ245)

作者简介:李伟(1974—),男,博士,研究员,主要研究方向为牵引传动及控制研究,Email:tkylw@yahoo.com

电气传动 2024年 第54卷 第10期

入、整流功率模块和中间直流环节。其中交流输 入主要包括变压器、线路接触器K₁、预充电电阻R 和预充电接触器K₂,变压器可将接触网提供的高 压电降为变流器输入所需电压,K₁在四象限整流 器正常工作时闭合,将交流电送入整流功率模 块,K₂仅在主回路刚刚上电时为中间直流环节充 电使用,可将R接入以限制充电电流。整流功率 模块(由T₁~T₄,D₁~D₄构成)则可将交流电变换为 直流电,并且保证能量的双向流动。直流环节主 要包括支撑电容C_d和二次滤波装置(由电感L₂和 电容C₂共同构成),C_d确保中间直流环节的二倍频 电流提供通路^[2],避免其导致直流电压出现脉动。





如果四象限整流器在运行时部件出现故障, 那么必然会导致变流器无法正常工作,通常此时 最直接的现象将是出现异常的电压或电流。表1 列出了不同部件故障时四象限整流器可能出现 的结果。

表1 四象限整流器不同部件故障时的现象

Tab.1 The phenomenon of different components fault of the four-quadrant rectifier

序号	故障部件	结果
1	六山山四	运行时被短接,无法检测。只能在充电
	兀电电阻	过程进行测试
2	功率模块	运行中出现模块短路或断路将导致输入
		电流或中间直流环节电压异常
3	支撑电容	中间直流环节电压纹波增加
4	二次滤波环节	中间直流环节电压出现二倍频脉动

从表1中可以看出,当不同部件出现故障时 主要反映在电压和电流结果的异常上,但是如何 做进一步分析以确定真正的故障点更为重要。

2 故障检测方法

在前面对四象限整流器不同部件运行过程 中出现故障的结果进行了初步分析,但是运行过 程中能够检测到的信息是有限的,通常只能判断 出电压电流异常,此时故障保护的结果一般都是 要停止故障变流器工作,并根据其严重程度判断 是否能够重新投入运行。如果需要进一步确定 实际的故障原因,四象限整流器预充电过程⁶⁰对 相关参数的检测就极为重要。下面重点介绍预 充电时主回路特点和充电过程分析。

2.1 预充电主电路

四象限整流器中间直流环节预充电主要目 的是通过充电电阻的限流作用防止中间直流环 节电容上出现过高的电流冲击,避免部件损坏。 预充电过程的主要特点是四象限整流器并未启 动工作,此时仅通过与IGBT反并联的二极管进 行不控整流,线路接触器K,尚未闭合,预充电接 触器K,闭合,因此图1的主电路可以简化为如图 2a中所示。在图2a中输入电压u,为正弦交流电, 此时电源将通过预充电电阻R、整流模块二极管 向中间直流环节的支撑电容C。和二次滤波环节 的电容C2充电,i,为输入电流,u,为中间直流环节 电压。为分析方便可将图2a进一步等效为图2b, 在图2b中预充电电阻被移至直流环节,输入电压 u"等效为将正弦交流电全波整流后的脉波电压, i_m为输入电流。另外图 2b 中的二极管 D 主要目 的在于利用其逆止效应,当输入电压低于中间直 流环节电压时不会形成反向的放电,这与实际四 象限整流器的充电过程也是一致的。



Fig.2 Equivalent circuit diagram of pre-charging process 图 2b 中输入电压、电流与图 2a 中对应关系

如下:

$$u_{\rm in} = \begin{cases} u_{\rm n} & u_{\rm n} \ge 0\\ -u_{\rm n} & u_{\rm n} < 0 \end{cases}$$
(1)

$$i_{\rm in} = \begin{cases} i_{\rm n} & u_{\rm n} \ge 0\\ -i_{\rm n} & u_{\rm n} < 0 \end{cases}$$
(2)

2.2 充电过程分析

首先针对图2b中方框内的电路进行分析,采用Laplace变换方式可列出中间直流环节阻抗X_d如下:

$$X_{\rm d} = \frac{s^2 L_2 C_2 + 1}{s(s^2 L_2 C_2 C_{\rm d} + C_{\rm d} + C_2)}$$
(3)

从式(3)可以看出该阻抗阶数较高,如不进行必要简化将增加后续分析的复杂性。

如前所述,L₂和C₂构成二次滤波环节,因此 有下式成立^[7]:

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \tag{4}$$

式中:ω2为二次滤波谐振角频率。

将式(4)代入式(3)中,同时用Laplace变换为 角频率的表示形式可得:

$$X_{\rm d} = j \frac{\frac{\omega^2}{\omega_2^2} - 1}{\omega(-\frac{\omega^2}{\omega_2^2}C_{\rm d} + C_{\rm d} + C_2)}$$
(5)

通常在50 Hz 工频电网供电时,谐振频率为 100 Hz,即

$$\omega_2 = 2\pi f_2 = 200\pi \tag{6}$$

如图 2b 所示,由于四象限整流器在充电过程 中基本处于直流工况,并且二极管本身具有逆止 效应,因此在充电过程中 $\omega << \omega_2$,则式(5)可简 化为

$$X_{\rm d} = \frac{1}{j\omega(C_{\rm d} + C_2)} = \frac{1}{s(C_{\rm d} + C_2)}$$
(7)

在后面的频域分析和仿真计算中也表明这 种简化是合理的。

依据图2b电路,考虑二极管的逆止效应,同时结合式(7)的阻抗表达式可列出电路方程如下:

$$\begin{cases} u_{in} + i_{in}R = u_{d} \\ i_{in} = s(C_{d} + C_{2})u_{d} \end{cases} u_{in} > u_{d}$$
(8)

$$\begin{cases} u_{d} = Const \\ i_{in} = 0 \end{cases} \qquad \qquad u_{in} \le u_{d} \qquad (9)$$

式(8)和式(9)为输入电源向中间直流环节预充 电过程的电路方程,其中式(8)为输入侧向中间 92 直流环节提供能量的方程,式(9)表明二极管处 于逆止状态时中间电压将维持恒定,没有能量的 流动。本文重点关注的是式(8),即输入电流和 中间直流环节电压变化的情况,将式(8)转化为 微分方程如下式所示:

$$\begin{cases} u_{in} + i_{in}R = u_{d} \\ i_{in} = (C_{d} + C_{2}) \frac{du_{d}}{dt} \end{cases}$$
(10)

采用离散化方法^[8-9]将式(9)离散化,并设 $C=C_a+C_2$ 可得到离散化后的方程表达如下:

$$u_{\rm in}(t_k) + Ri_{\rm in}(t_k) = u_{\rm d}(t_k)$$
 (11)

$$i_{\rm in}(t_k) = \frac{C}{T_{\rm s}} \left[u_{\rm d}(t_{k+1}) - u_{\rm d}(t_k) \right]$$
(12)

式中: T_s 为采样周期; $u_{in}(t_k)$, $i_{in}(t_k)$, $u_d(t_k)$ 分别为输入电压、输入电流和中间直流环节电压的采样值。

由于*u*_{in},*i*_{in}和*u*_d均为四象限整流器进行控制 时所需要采集的参数^[10],因此根据式(11)可估算 当前变流器的输入电流值,而式(12)则可估算下 一周期中间直流环节电压值。但是式(12)为微 分方程离散化后的形式,通常采样周期较小,估 算得到的中间直流环节电压与实际值在相邻的 采样周期之间相差不大,因此采用连续时间段内 的实际电流进行中间直流电压的估算,即式(12) 可改写为如下形式:

$$u_{\rm d}(t_{k+1}) = u_{\rm d}(t_0) + \frac{T_{\rm s}}{C} \sum_{1}^{k} i_{\rm in}(t_i)$$
(13)

图3是预充电故障诊断流程图,从图中可以 看到,如果估算输入电流和中间电压在正常允许 范围表明变流器正常,如果估算输入电流或中间 电压超出规定范围则进入故障判断程序,具体故 障判断方法如表2所示。需要注意的是,图3中 用于故障判断的电流是图2b中的输入电流,如与 实际变流器输入电流比较还应根据式(2)进行变 换,转换至图2a中的变流器输入电流。关于故障 判断阈值设置主要考虑传感器、信号转换、采样 等环节的精度,阈值过小易产生误保护,阈值过 大则容易导致保护时间增加,甚至保护失效。因 此本文实际使用的保护阈值按直流环节电压和 预充电电流最大值的3%设定。

传统预充电检测方法通常在预充电开始一 定时间后测试中间直流环节电压是否达到预定 的限值范围,通常需要s级的检测时间。而本文 提出的检测方法的优势在于当预充电开始时即



图 3 预充电故障诊断流程图 Fig.3 Pre-charging fault diagnosis flowchart

表2 预充电过程故障判断

Tab.2 Failure judgment of the pre-charging process

参数	故障判断		
	$>i_{in}(k)$	$\langle i_{ m in}(k)$	
$i^*_{ m in}(k)$	充电环节存在接触不	充电环节存在短路故障或充	
	良或断路情况	电电阻异常	
	$>u_{\rm d}(k)$	$< u_{d}(k)$	
$u_{\mathrm{d}}^{*}(k)$	通常与充电环节存在	直流环节电容值发生变化、	
	短路相关	二次滤波环节开路等	

进行实时估算,如果存在故障,能够在更短的时间得到检测结果。另外,如果充电过程没有异常,还可在充电过程中估算*R*和*C*,最终可采用回归分析得到本次充电过程中的期望值,通过长期积累该数据可以反映变流器相关部件特性参数 变化,以用于变流器的健康管理系统。

另外如果存在多个故障同时发生,则需要对 故障进行具体分析。多个故障发生时存在两种 可能的结果:一种情况是严重的故障掩盖了其他 故障特征,单纯从充电环节测量的数据无法区 分,例如中间直流环节短路与二次滤波环节开 路,此时数据只能反映出短路情况,需待严重故 障处理完成后再进行其他故障处理;另外一种是 故障信息的叠加,如模块短路故障与二次滤波环 节开路,单纯依靠故障模型进行判断可能较为复 杂,因为故障组合之后的状态可能呈几何级数增加,此时建议考虑采用聚类分析等方法对故障数据进行判断。

3 仿真计算

3.1 仿真概述

仿真采用如图2a所示的主电路,故障判断流 程按图3进行编写。首先针对中间直流环节部件 阻抗参数进行了频域分析,比较了式(3)和式(7) 两种中间直流环节阻抗下整个电路阻抗的频域 特性,并比较了两种阻抗下中间直流环节的充电 过程。另外针对功率器件短路、二次滤波环节开 路和中间直流环节短路三种故障分别进行了仿 真,需要说明的是,在仿真和后面的试验中检测 到故障后只是将故障位置位,没有停止预充电过 程。仿真的基本参数如下:电源电压 $U_n=1900$ V, 预充电电阻 $R=56 \Omega$,直流侧支撑电容 $C_a=3$ mF, 直流环节工作电压3 300 V,二次滤波电感 $L_2=$ 0.603 mH,二次滤波电容 $C_2=4.2$ mF。

3.2 仿真结果

图4为不同中间直流环节阻抗下预充电回路 阻抗的频率特性,上半部分为式(3)对应的阻抗 特性,下半部分为式(7)对应的阻抗特性,从图中 可以看出除在155 Hz附近式(3)对应的阻抗较 大,两种阻抗特性在低频部分基本是一致的,这 与前面的分析也是对应的。图5为两种阻抗下的 预充电过程比较,从该图也可以看出两种阻抗下 中间直流环节电压的变化基本保持一致,均在预 充电开始后3s达到2400V左右。由此可见式 (7)所做的简化是合理且切实可行的。



图6模拟了功率开关器件T₁短路时的充电过程,图中从上至下分别为故障信号、中间直流环



节电压、输入电流,虚线波形为本文方法估算的 电压和电流。从图6中可以看出,在电源正半波 电源电流幅值逐步降低,但是在负半波电流幅值 则基本保持不变,说明只有正半波时向中间直流 环节充电,而负半波则通过T₁形成短路。从直流 环节电压的上升过程也可以看出,中间直流环节 实际电压相比本文方法估算的电压明显要低,在 预充电开始后 0.5 s 仅达到 800 V 左右,而图 5 中 正常充电过程则已达到 1 300 V 左右,而图 5 中 正常充电过程则已达到 1 300 V 左右,因此这种 故障导致达到相同电压时所需的充电时间会更 长。另外采用本文故障诊断预估的电流值在正 半波与实际电流出现了明显的偏差。根据本文 的故障检测方法在充电开始后的 0.05 s 左右即可 检测到故障的存在。



图7为二次滤波环节开路时的仿真波形,从 图中可以看出本文故障诊断预估的中间直流环 节电压比实际电压要低,这主要是由于直流环节 电容值的减少导致在同样电流下充电更快,在充 电开始后的0.5 s即达到了1900 V左右。由于变 流器输入电流是根据实际中间直流环节电压估 算,因此与实际电流基本一致。根据本文的故障 94 检测方法在充电开始后 0.02 s 左右即检测到故障 的存在。



Fig.7 Open circuit condition simulation of secondary filter link

图8为中间直流环节短路时的充电过程模 拟,从图中可以看出,在电源正负半波电源电流 均比较大。但是中间直流环节电压由于短路,实 际电压一直保持在0V,与本文故障诊断预估的 电压值明显不一致,根据本文的故障检测方法在 充电开始后0.025s左右即检测到故障的存在。



4 试验验证

采用变流器机组进行了故障诊断功能的试验验证,试验系统主要电路参数与仿真基本相同。试验系统结构如图9所示,外部10kV供电送入实验室,由实验室内部的升压变压器升至25kV,然后通过牵引变压器降压至1900V送至牵引变流器。虽然实际机组以及供电条件与仿真会有差别,但是对于本文的故障诊断结果是相同的。试验中的故障采用电缆短路或开路的方式进行模拟,故障的类型与仿真中的相同。

图 10 为功率开关器件 T₁短路时的实际充电 过程。图 10a 为变流器中间环节直流电压实际值



Fig.9 The main circuit structure of the test system 与估算值随时间变化的对比,图 10b 为变流器输 入电流实际值和估算值随时间变化的对比。从 图中可以看出与仿真类似,在电源正半波实际输 入电流幅值没有衰减,预估的电流值与实际电流 出现了偏差,同时估算电压比实际电压高,估算 的中间电压在1s后已经达到可能的最大限值 3 500 V。在充电开始后不到 0.1 s 检测到故障 的存在。





图 11 为二次滤波环节开路时的试验波形,与 仿真类似,预估的中间直流环节电压比实际电压 要低,在充电开始后的 0.5 s 即达到了 2 000 V 左 右,在充电开始后很快就检测到故障的存在。

图 12 为中间直流环节短路时的充电过程试验,其结果与仿真时类似,输入电流幅值基本保持不变,实际中间直流电压一直保持为零,而估算中间直流环节电压则明显偏高,不到 0.8 s 就已经达到可能的最大限值 3 500 V,根据本文的故障检测方法在充电开始后很快检测到故障的存在。

通过仿真与实际试验对比可以看出,由于仿 真中所有器件均为理想状态,不存在输入检测误 差和信号延时等因素,而实际试验中存在信号转 换、采样误差、参数匹配等问题,导致仿真和试验





电压/V(1 000 V/格)



of secondary filter link



时间/s(0.2 s/格) (a)中间直流电压估算





结果存在一定差异,但是从仿真和试验的总体效 果上看,本文的故障检测方法能够根据输入电流 和中间直流电压的估算值和实际值的比对迅速 有效地检测到故障现象。

5 结论

交流传动系统已经成为我国铁路机车车辆 牵引的主流,并逐步发展成熟,但是由于交流传 动系统本身的复杂性,一旦出现故障可能导致动 力丧失,对故障的准确定位和判断对于维修具有 重要指导意义,因此针对部件的故障诊断仍需进 一步加强。本文针对四象限整流器在实际运行 中可能出现的故障提出了诊断方法,并采用仿真 和试验对故障诊断方法进行了确认。结果表明, 本文提出的方法切实可行,能够迅速检测各种故 障现象,可以满足四象限整流器故障诊断的要 求,亦可通过相关测量参数判断部件的特性参数 变化,从而为变流器的故障处理和健康管理提供 支持。另外针对多种故障同时出现的情况,如何 快速确定故障原因并加以区分,后续有必要进行 更深入的研究。

参考文献

- BIMAL K B. Modern power electronics and AC drives[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [2] 李伟,马志文,蔡华斌,等.无二次滤波环节的单相四象限整流器输入电流控制研究[J].铁道学报,2014(5):28-33.
 LI Wei, MA Zhiwen, CAI Huabin, et al. Control of input current of PWM rectifier without secondary filter circuit[J]. Journal of the China Railway Society,2014(5):28-33.
- [3] 马小亮. 调速用交-直-交电压型变频器的几个应用问题[J]. 电气传动,2020,50(1):3-13.

MA Xiaoliang. Discussion on several problems of industrial speed regulation applications of AC-DC-AC voltage source

(上接第82页)

ZHU Lingzhi, QU Linan, LIU Chun, et al. Improved calculation method of equivalent short-circuit ratio for power generation cluster of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22):74–82.

- [14] 李志强,何凤军,郭强,等.青南新能源集中送出地区动态无 功补偿方案对比研究[J].现代电力,2021,38(1):87-93.
 LI Zhiqiang, HE Fengjun, GUO Qiang, et al. Comparative study on dynamic reactive power compensation scheme in the concentrated delivery area of new energy in southern Qinghai[J]. Modern Electric Power, 2021,38(1):87-93.
- [15] 程进,潘智轩,程海锋,等.双馈感应风力发电机的电压/频 率协调控制策略[J].电气传动,2022,52(23):18-27.
 CHENG Jin, PAN Zhixuan, CHENG Haifeng, et al. Voltage/frequency coordinated control strategy of doubly-fed induction wind turbine[J]. Electric Drive,2022,52(23):18-27.

converter[J]. Electric Drive, 2020, 50(1): 3–13.

- [4] BURKOV A T, VALINSKY O S, EVSTAF'EV A M, et al. Modern locomotive traction drive control systems[J]. Russian Electrical Engineering, 2019, 90:692–695.
- [5] SUI Seung-Ki. Control of electric machine drive systems[M]. New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2011.
- [6] 邹档兵,翁星方,荣智林,等.轨道牵引用主变流器充放电电 阻的参数计算与选型方法[J]. 机车电传动,2012(3):20-22.
 ZOU Dangbing, WENG Xingfang, RONG Zhilin, et al. Design and selection type method for charging and discharging resistors in traction converter[J]. Electric Drive for Locomotives, 2012(3):20-22.
- [7] NILSSON James W, RIEDEL Susan. Electric circuits[M]. 10th Edition. New Jersey: Pearson Education, 2019.
- [8] 李伟,张黎,马志文,等.三电平网侧变流器预测电流控制及
 其与两电平变流器比较[J].中国铁道科学,2008,29(6):77-81.

LI Wei, ZHANG Li, MA Zhiwen, et al. Predictive current control of three-level line-side converter and comparison with twolevel converter[J]. China Railway Science, 2008, 29(6):77– 81.

- [9] 章志兵,张志学.单相三电平整流器控制方法及中点平衡的研究[J]. 机车电传动,2008(4):34-38.
 ZHANG Zhibing, ZHANG Zhixue. Study of control strategies and neutral point voltage balancing of single phase three-level rectifier[J]. Electric Drive for Locomotives,2008(4):34-38.
- [10] 邱忠才,肖建,郭冀岭,等. 机车变流器对高速铁路牵引网谐振的影响[J]. 电气传动,2013,43(S1):32-39.
 QIU Zhongcai, XIAO Jian, GUO Jiling, et al. Research on control method of electric locomotives to suppress resonance problems of high-speed railway traction network[J]. Electric Drive, 2013,43(S1):32-39.

收稿日期:2022-09-03 修改稿日期:2023-02-14

[16] 詹锦,陈波,熊永新,等.利用调相机提升送端双馈风机高电
 压穿越能力的协调控制[J].电力系统保护与控制,2020,48
 (18):59-68.

ZHAN Jin, CHEN Bo, XIONG Yongxin, et al. Coordinated control for improving the HVRT capability of a DFIG wind farm using a synchronous condenser[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18):59–68.

[17] 刘炳辰.高比例新能源送出系统动态无功补偿方案研究[D].北京:华北电力大学,2021.

LIU Bingchen. Dynamic reactive power compensation scheme of high proportion new energy transmission system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.

> 收稿日期:2023-03-06 修改稿日期:2023-03-24