

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221880

# 干式变压器绕组匝间短路故障的电磁特征及电动力分析

郝 艳<sup>1</sup>, 咸日常<sup>1</sup>, 胡玉耀<sup>1</sup>, 张海强<sup>2</sup>, 郭 洋<sup>1</sup>, 李佳琪<sup>1</sup>

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000; 2. 国网山东省电力公司淄博供电公司, 山东 淄博 255000)

**摘要:** 干式变压器低压绕组的匝间绝缘故障不易通过外观表征直接发现, 且难以实现实时监测, 严重影响供电可靠性。针对干式变压器低压绕组匝间短路故障时的电磁特征研究不足而导致故障检测方法缺失及实际研究中难以设置绕组匝间短路故障的问题, 利用有限元仿真软件建立与实际干式变压器一致的“场—路”耦合模型, 并验证了该模型在额定运行工况下的准确性。在此基础上探究低压绕组发生匝间短路故障时其短路点电流、短路匝电流、短路匝电流密度及短路匝辐向磁密和轴向磁密等电磁参数的变化规律, 研究在绕组不同位置发生匝间短路故障时短路匝所受电动力的分布情况。结果表明, 绕组不同位置发生匝间短路时, 磁密最大值出现在最外层短路匝; 最外层短路匝所受辐向力最大, 最内层短路匝所受轴向力最大。研究结果为干式变压器匝间绝缘在线监测和保护技术提供了理论依据, 有利于抗短路能力提升措施的研究与实施。

**关键词:** 干式变压器; 有限元仿真; 匝间短路; 电磁特征; 电动力

**中图分类号:** TM411

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)08-0214-05

## 1 引言

干式变压器具备维护简便、损耗低、无油化、抗短路能力强等特点, 在市区供电系统应用广泛。但受工艺材料、运行环境及负载特性的影响, 干式变压器绕组绝缘老化问题仍很突出, 极易发生绕组匝间短路故障。调查统计发现, 约 55% 的电力变压器本体故障是由匝间短路引发, 进而威胁电力系统的稳定运行<sup>[1-3]</sup>。对干式变压器正常运行时的电磁特征、出口侧短路后的负载振动特性、温度场等已有大量研究<sup>[4,5]</sup>, 而对内部绕组发生匝间短路故障的研究较少。由于干式变压器内部发生绕组绝缘故障, 不易通过外观的表征现象直接发现。在实际试验研究中, 匝间短路故障不易设置, 目前尚无针对干式变压器匝间短路故障特别有效的检测装置, 因此通过仿真建模设置绕组匝间短路故障<sup>[6]</sup>, 研究干式变压器匝间绝缘故障状态时的电磁特征及电动力分布情况, 对实施干式变压器匝间绝缘在线监测和保护技术, 提高抗短路能力具有重要意义。本文以一台 SCB10-250 的干式变压器为例, 利用有限元软件建立与实际

干式变压器一致的“场—路”耦合模型, 在验证模型的正确性的基础上, 通过外电路编辑器设置绕组匝间短路故障, 仿真分析该干式变压器不同位置绕组发生匝间短路故障时的电磁参数变化特征及短路匝所受短路电动力的分布特点, 利于开展设备故障检测及制造工艺改进。

## 2 干式变压器几何模型的建立与验证

### 2.1 模型的建立

为探究干式变压器绕组发生匝间短路故障时电磁特征及电动力的变化情况, 以某公司一台容量为 250 kVA、电压为 10/0.4 kV 的干式变压器为例, 该干式变压器在实际运行中突然烧毁, 经解体后发现该干式变压器 A 相最外层低压绕组绝缘受损。在有限元仿真软件 ANSYS 中建立与该干式变压器实际参数一致的仿真模型, 其主要参数见表 1。

绘制的干式变压器三维几何模型的整体结构图、侧视图、俯视图见图 1。外侧的分段绕组为采用普通扁导线绕制而成的高压绕组; 内侧低压绕组采用铜箔; 轴向气道将低压绕组平均分为内、外

**收稿日期:** 2022-09-09, **修回日期:** 2022-11-01

**基金项目:** 国家重点研发计划(2017YFB0902800)

**作者简介:** 郝艳(1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电气设备在线监测与故障诊断技术, E-mail: 542202747@qq.com

**通讯作者:** 咸日常(1966-), 男, 教授、博导, 研究方向为电气设备状态检测与故障诊断技术, E-mail: xianrc@163.com

表 1 干式变压器模型参数

Tab. 1 Dry-type transformer model parameters

名称	单位	参数值	名称	单位	尺寸
额定容量	kVA	250	铁心直径	mm	140
额定电压	kV	10/0.4	铁心窗高	mm	520
额定电流	A	14.4/360.8	中心距	mm	355
联结组别		Dyn11	铁轭高度	mm	70
高压绕组匝数	匝	1 091	高压绕组高度	mm	410
低压绕组匝数	匝	24	低压绕组高度	mm	430

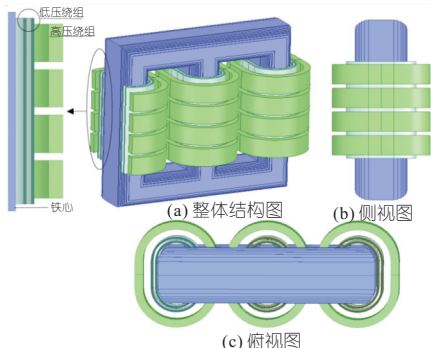


图 1 干式变压器三维几何模型

Fig. 1 Three-dimensional model of dry-type transformer

两层。另外,为方便研究该故障干式变压器的低压绕组发生匝间短路故障时其电磁特征及短路电动力的变化情况,本文细化故障匝所在的 A 相低压绕组。

外电路按与实际联结组别一致的 Dyn11 型进行连接,并添加激励源,仿真时间设置为 100 ms,步长为 2 ms。将外电路激励源导入所建干式变压器几何模型,可构建“场一路”干式变压器耦合模型。

2.2 模型的验证

为验证所建立模型的正确性,对额定正常运行时的干式变压器模型进行仿真,得到该干式变压器的空载损耗、空载电流、负载损耗及短路阻抗等性能参数的仿真值、解析计算值及试验值,对比结果见表 2。由表 2 可知,因建模过程中材料的参数设置与实际存在一定偏差及网格剖分不精确等因素,故仿真值、解析计算值与试验值存在一定的误差,但最大误差在工程允许的 5% 误差范围内,验证了该仿真模型的准确性。

表 2 干式变压器性能参数对比

Tab. 2 Comparison of performance parameters of dry-type transformers

项目	空载损耗/W	空载电流/%	负载损耗/W	短路阻抗/%
仿真值	698	0.61	3 358	3.89
解析计算值	720	0.45	3 480	4.00
试验值	704	0.83	3 425	4.01

3 匝间短路故障的仿真模型分析

以 A 相低压侧最外层绕组发生匝间短路故障为例,为了更清晰地表征最外层绕组发生匝间

短路故障时,短路匝电流、非短路匝电流及短路点处电流的方向及物理意义,绘制了最外层绕组发生匝间短路故障时故障处的俯视图见图 2。由图 2 可知,当干式变压器绕组发生匝间短路故障时,短路匝电流和非短路匝电流即主回路电流的方向相反,且二者均流经短路点,因此短路点的电流为短路匝电流与非短路匝电流之差。为进一步研究短路匝电流和短路点电流的数值关系,将构建单匝绕组匝间短路故障耦合模型进行仿真分析。

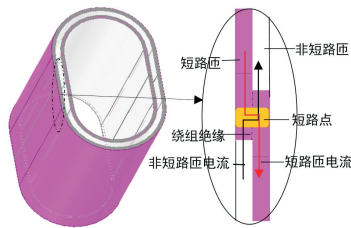


图 2 最外层绕组匝间短路故障时短路匝及短路点示意图

Fig. 2 Schematic diagram of short circuit turn and short circuit point in outer winding interturn short circuit fault

当该干式变压器低压侧绕组发生单匝匝间短路故障时,其等效电路图见图 3。图 3 中, $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$  分别为高压侧相电压; $I'_A$ 、 $I'_B$ 、 $I'_C$ 、 $I'_a$ 、 $I'_b$ 、 $I'_c$  分别为高、低压侧绕组相电流; $R_A$ 、 $R_B$ 、 $R_C$ 、 $R_{a1}$ 、 $R_{a2}$ 、 $R_b$ 、 $R_c$  分别为高、低压侧绕组电阻; $L'_A$ 、 $L'_B$ 、 $L'_C$ 、 $L_{a1}$ 、 $L_{a2}$ 、 $L'_b$ 、 $L'_c$  分别为高、低压侧绕组自感; $Z_a$ 、 $Z_b$ 、 $Z_c$  均为负载阻抗; $M'_{Aa1}$ 、 $M'_{Aas}$ 、 $M'_{Bb}$ 、 $M'_{Cc}$  分别为高、低压侧绕组互感; $R_q$  为接触电阻; $R_{as}$ 、 $L_{as}$  分别为短路匝电阻、电感。

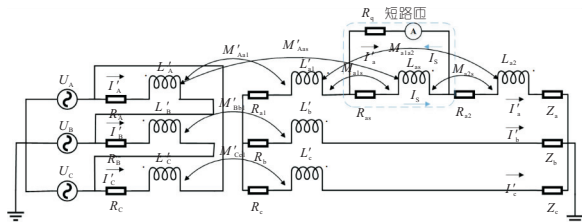


图 3 绕组匝间短路故障等效电路图

Fig. 3 Winding interturn short circuit fault equivalent circuit diagram

在外电路编辑器中按图 3 所示匝间短路故障等效电路进行连接并施加激励源,可得到绕组单匝匝间短路故障的“场一路”耦合模型,为研究干式变压器绕组匝间短路故障时的电磁特性及短路电动力提供理论依据和数据支撑。

4 干式变压器绕组匝间短路故障后电磁特性分析

4.1 干式变压器低压绕组匝间短路绕组电流分析

图 4 为干式变压器低压绕组匝间短路绕组电

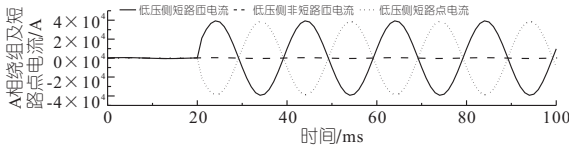


图4 干式变压器低压绕组匝间短路绕组电流分析

Fig. 4 Analysis of interturn short circuit winding current of low voltage winding of dry-type transformer

流分析。由图4可知,当干式变压器A相低压侧绕组发生匝间短路故障时,低压侧非短路匝绕组电流即主回路电流变化甚微,不能及时监测匝间短路故障,致使故障进一步扩大。

短路匝电流剧增,这是由于当发生匝间短路故障时,绝缘因遭到破坏,使接触电阻  $R_q$  极小,短路匝感应电压作用于  $0.096\text{ m}\Omega$  的短路匝电阻  $R_{as}$  及  $0.001\text{ m}\Omega$  短路点的接触电阻  $R_q$  上,因此短路匝电流极大。由图3可知,虽然接触电阻两端的电压随接触电阻的减小而减小,但由于短路点的电流即流过接触电阻的电流等于短路匝电流与流过短路点的非短路匝电流之差,因此短路点的电流随短路匝电流的增大而增大,且比短路匝电流小,公式为:

$$I_q = I_s - I'_a \quad (1)$$

式中,  $I_q$  为短路点电流;  $I_s$  为短路匝电流;  $I'_a$  为非短路匝电流。

由式(1)可知,当绕组发生完全匝间短路时,  $38\ 689.8\text{ A}$  的短路点电流幅值为  $39\ 200\text{ A}$  的短路匝电流幅值与  $510.2\text{ A}$  的非短路匝电流幅值之差。由此可知,短路匝电流及短路点电流在短路瞬间数值极大,将对干式变压器造成不可逆的损坏。

#### 4.2 干式变压器低压绕组匝间短路磁通分布

基于干式变压器匝间短路绕组电流特性分析,进一步研究发生故障时铁心及短路匝的磁场分布情况,构造磁场模型分析路径,见图5。图5中,路径1为铁心磁通路径;路径2为A相最外层低压绕组的漏磁通路径。最内层和最外层绕组匝间短路故障时磁密分布情况见图6。由图6(a)、(d)可知,当干式变压器绕组发生匝间短路故

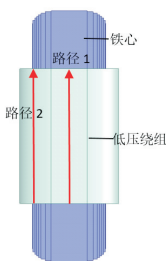


图5 磁场模型分析路径

Fig. 5 Analysis path of magnetic field model

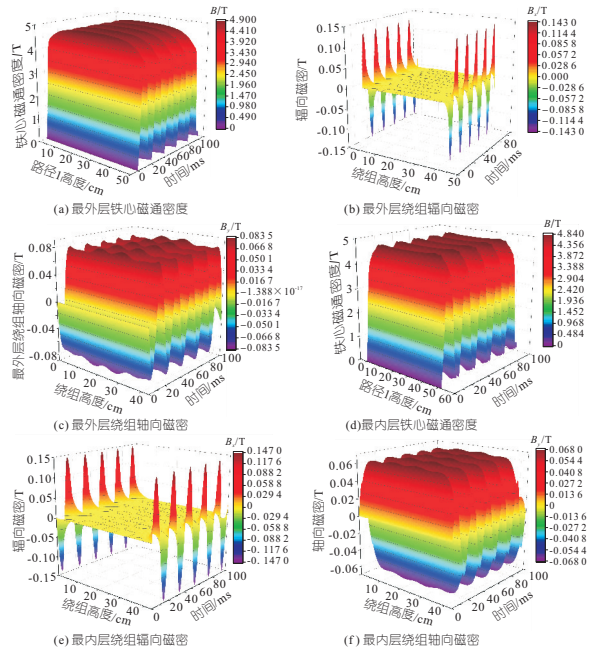


图6 最外层、最内层绕组匝间短路故障时磁密分布情况

Fig. 6 Magnetic density distribution of outermost and innermost winding during interturn short circuit fault

障时,短路匝附近铁心励磁趋于饱和。对比图6(b)、(e)可知,不同位置绕组匝间短路时,短路匝的辐向磁密分布规律大致相同,辐向磁密的最大值出现在绕组两端,大小相近且方向相反,向中部减小,且最大值出现在最外层短路匝。对比图6(c)、(f)可知,当最外层绕组发生匝间短路故障时绕组端部轴向磁密最大,向中部略微减小,而当最内层绕组发生匝间短路故障时,其轴向磁密最大值则出现在绕组中部,可见最外层短路匝整体轴向磁密大于最内层短路匝轴向磁密。

### 5 短路匝电动力分析

当干式变压器发生匝间短路时,其绕组在短路电流与周围漏磁场的相互作用下产生的短路电动力很大,易使绕组发生变形甚至断裂,破坏绕组绝缘,影响干式变压器的安全运行。因此,为提升干式变压器绕组抗短路能力,比较绕组不同位置匝间短路时短路匝产生的电动力十分必要。

由洛伦兹力公式可得,单位长度绕组的辐向电磁力  $F_x$  与轴向电磁力  $F_y$  计算式分别为:

$$F_x = B_y i \quad (2)$$

$$F_y = B_x i \quad (3)$$

式中,  $B_y$  为轴向磁密;  $B_x$  为辐向磁密;  $i$  为绕组流过的电流。

假设该干式变压器在  $20\text{ ms}$  时低压侧最外层绕组发生匝间短路故障,由干式变压器低压绕组

匝间短路绕组电流分析可知,当干式变压器低压侧绕组发生匝间短路故障时,流过短路匝的电流及绕组漏磁场均发生了畸变,因此短路匝所受短路电动力也将发生变化,短路匝随绕组高度及时间变化,其所受辐向力和轴向力的变化见图 7。

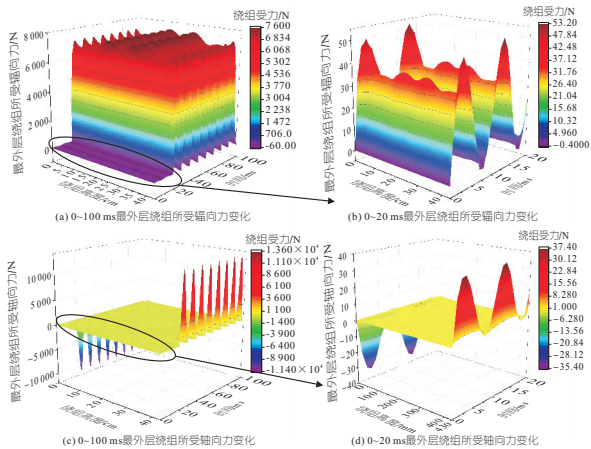


图 7 最外层绕组匝间短路故障时受力变化情况

Fig. 7 Force variation of outer winding during interturn short circuit fault

由图 7(b)可知,当绕组额定运行时,绕组所受辐向力随时间呈波浪形变化,且由轴向磁密在绕组中产生的辐向力在该层绕组两端最大,并从两端向中部减小。由图 7(a)可知,当最外层绕组发生匝间短路故障时,短路匝处所受辐向力突增。对比图 6(c)发现,短路匝所受辐向力与轴向磁密分布规律基本一致。

由图 7(d)可知,当绕组未发生故障时,绕组所受轴向力随时间同样呈平稳波浪形变化,由辐向磁密在绕组中产生的轴向力在该层绕组两端最大,且方向相反,向中部逐渐减小。由图 7(c)可知,当最外层绕组发生匝间短路故障时,短路匝两端所受轴向力剧增,随时间呈尖锐波浪形变化。对比图 6(b)发现,短路匝所受轴向力与辐向磁密分布规律基本一致。

仿真分析绕组不同位置匝间短路的最大辐向力和最大轴向力,其结果见表 3。由表 3 可知,当短路点出现在最外层绕组时,其受到的辐向力最大;当短路点出现在最内层绕组时,其受到的轴向力最大。

表 3 绕组不同位置匝间短路的受力最大值

Tab. 3 Maximum force of winding interturn short circuit at different positions

受力	最外层绕组	中间绕组	最内层绕组
辐向力最大值	7 600	6 200	5 000
轴向力最大值	13 600	13 800	14 100

为研究干式变压器绕组发生匝间短路故障时受力形变情况,分别取绕组正常运行时刻 19 ms

和发生故障时刻 20 ms,绘制 A 相低压绕组受力图,见图 8。其中,图 8(a)为额定运行工况下,低压绕组所受短路电动力分布图;图 8(b)为最外层绕组发生匝间短路故障时,低压绕组所受短路电动力分布图。

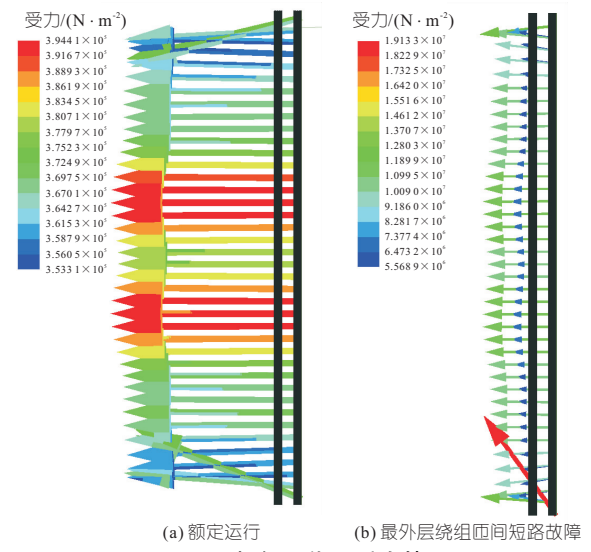


Fig. 8 Stress of A phase low voltage winding

由图 8(a)可知,额定运行工况下,低压绕组中部主要受到幅向向内挤压的辐向力。同时,低压绕组两端主要受到轴向向中部压缩的轴向力。由图 8(b)可知,最外层绕组发生匝间短路故障时,低压绕组所受短路电动力突增,且主要以向内挤压的辐向力为主,并在下端出现极大向内压缩的轴向力,致使绕组弯曲变形。

综上所述可知,在干式变压器制造过程中,应着重增强低压绕组两端的绝缘强度,加强靠近铁芯侧线匝的轴向压紧措施及重点校核远离铁芯侧线匝的辐向力,从而避免绕组中部受力变形,甚至绝缘受损导致设备烧毁。

## 6 结论

- a. 干式变压器绕组发生匝间短路时,主回路电流变化甚微,短路匝及短路点电流剧增。
- b. 干式变压器绕组不同位置发生匝间短路时,短路匝的辐向磁密分布规律基本一致,且最大值出现在最外层短路匝;轴向磁密随短路点位置的变化,其分布规律并不相同,且最外层短路匝整体轴向磁密最大。
- c. 最外层短路匝所受辐向力最大,其分布规律与轴向磁密基本一致;最内层短路匝所受轴向力最大,其分布规律与辐向磁密基本一致;同时干式变压器低压绕组受到幅向向内挤压、轴向向中部压缩的短路电动力而易弯曲变形。

参考文献:

[1] 靳宏,金龙,徐志科. 干式变压器高压绕组电场有限元分析[J]. 水电能源科学,2012,30(3):173-176,135.

[2] 蒋志勇. 典型结构的环氧浇注干式变压器漏磁场仿真与分析[J]. 变压器, 2017, 54(1):32-37.

[3] WANG Y, FENG C, FEI R, et al. Thermal-ageing characteristics of dry-type transformer epoxy composite insulation[J]. High performance polymers,

2020, 32(6):095400832090643.

[4] 李周晨昕,袁鑫锋,徐鹏,等. 干式变压器短路故障前后负载振动特性分析[J]. 变压器,2020,57(2):31-38.

[5] 田慕琴,朱晶晶,宋建成,等. 基于流固耦合分析的矿用干式变压器温度场仿真[J]. 高电压技术,2016, 42(12):3972-3981.

[6] 戚日常,张冰倩,刘兴华,等. 应用有限元分析电力变压器绕组匝间短路的暂态特征[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(10): 130-138.

### Electromagnetic Characteristics and Electrodynamic Analysis of Dry-type Transformer Winding Interturn Short Circuit Fault

HAO Yan<sup>1</sup>, XIAN Ri-chang<sup>1</sup>, HU Yu-yao<sup>1</sup>, ZHANG Hai-qiang<sup>2</sup>, GUO Yang<sup>1</sup>, LI Jia-qi<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China; 2. Zibo Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Zibo 255000, China)

**Abstract:** The low voltage winding interturn insulation fault of dry-type transformer is not easy to find directly through the appearance of the phenomenon, and is difficult to real-time monitoring, seriously affecting the safe and stable operation of power systems. In view of the lack of fault detection methods due to insufficient research on the electromagnetic characteristics of single-turn interturn short-circuit faults in low-voltage windings of dry-type transformers, and the difficulty in setting interturn short-circuit faults in practical projects, finite element simulation software was used to establish a field-circuit coupling model which is consistent with the actual dry-type transformer, and the accuracy of the model was verified under rated operating conditions. On this basis, the variation rules of electromagnetic parameters of short-circuit turns at different positions were explored when interturn short-circuit faults occur in low-voltage windings. The distribution of electromagnetic force on short-circuit turns when interturn short-circuit faults occur in windings at different positions was simulated. The results show that when the interturn short circuit occurs at different positions of the winding, the maximum magnetic density appears in the outermost short-circuit turn; the outermost short-circuit turn is subjected to the largest radial force, and the innermost short-circuit turn is subjected to the largest axial force. Therefore, it provides a theoretical basis for on-line monitoring and protection technology of dry-type transformer interturn insulation, which is conducive to the research and implementation of measures to improve short-circuit resistance.

**Key words:** dry-type transformer; finite element simulation; interturn short circuit; electromagnetic characteristics; electric power

\*\*\*\*\*  
(上接第 222 页)

参考文献:

[1] 李欣然,黄际元,陈远扬,等. 大规模储能电源参与电网调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016,44(7):145-153.

[2] 李建林,马会萌,惠东. 储能技术融合分布式可再生能源的现状与发展趋势[J]. 电工技术学报,2016,31(14):1-10,20.

[3] AHAMED M, DISSANAYAKE U, SILVA H, et al. Modelling and simulation of a solar PV and battery based DC microgrid system[C]// International Conference on Electrical. IEEE,2016: 1706-1711.

[4] 张纯江,董杰,刘君,等. 蓄电池与超级电容混合储能系统的控制策略[J]. 电工技术学报,2014,29(4):

334-340.

[5] KRISHAN O, SUHAG S. A novel control strategy for a hybrid energy storage system in a grid-independent hybrid renewable energy system[J]. International transactions on electrical energy systems, 2020,30(4):e12262.

[6] 钟庆昌. 虚拟同步机与自主电力系统[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 336-348.

[7] 计长安,李伟,罗亚桥,等. 储能系统逆变器虚拟同步机控制算法研究[J]. 水电能源科学,2018,36(1): 200-202,52.

[8] 陈燕东,谭文娟,周小平,等. 混合储能系统功率自主分频控制方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019,46(4):65-73.

### Coordinated Control Strategy of Photovoltaic Hybrid Energy Storage Based on Improved Virtual Synchronous Generator

ZHAO Yong-xi, YU Jiang-rong

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

**Abstract:** New energy grid connection is easy to cause voltage fluctuation, frequency oscillation and other problems. For this, the paper adopts a frequency division control strategy of hybrid energy storage unit, which based on the storage of photovoltaic grid-connected system as the research subject, thus improving the dynamic stability of DC bus voltage, and proposes an improved virtual synchronous generator. According to the characteristics of flexible adjustment of inertia parameters, the virtual inertia and parameters are adjusted adaptively to suppress the frequency and power oscillation caused by the disturbance. Finally, a simulation model of photovoltaic storage grid-connection is established. It verifies that the proposed strategy can not only stabilize the DC bus voltage and supplement the power deficiency under different operating conditions. At the same time, it can slow down the sudden change of the system frequency and reduce the overshoot, showing good grid-connected performance.

**Key words:** photovoltaic storage and grid-connected system; improved virtual synchronous generator; hybrid energy storage; frequency regulation; energy management