

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.08.009

紧凑型三相立体式磁控配电变压器研究

刘春晖¹, 冯新文², 苏新永³, 陈浩然¹, 陈鑫跃¹, 陈柏超⁴

(1. 国网内蒙古东部电力有限公司电力科学研究院, 呼和浩特 010090; 2. 国网内蒙古东部电力有限公司, 呼和浩特 010013; 3. 国网赤峰供电公司, 内蒙古 赤峰 024099; 4. 武汉大学电气与自动化学院, 武汉 430072)

摘要: 针对电网长线路末端电压波动大且城市电网扩建困难的问题,提出了一种将可控电抗器与配电变压器相结合的紧凑型三相立体式磁控配电变压器,并通过理论推导与有限元仿真分析了其工作过程与优势。该紧凑型磁控配电变压器的铁心由3个完全相同的单框组成,每相绕组绕制在两个单框上,每个单框铁心的上下横扼部位都设有截面较小的磁阀,每个带气隙的小截面铁扼上均绕有直流励磁绕组。理论分析与有限元仿真结果表明,该紧凑型磁控配电变压器在保留原有配电变压器占地面积的基础上,既可以输出无功、提高无功电压控制能力,也可以正常变压和传递电能,且电压电流波形无畸变、无不平衡现象,适用于有高比例新能源接入、电缆化率高且空间有限的城市配电站。

关键词: 磁阀; 磁控电抗器; 配电变压器; 无功补偿; 电压波动

Research on Compact Three-phase Three-dimensional Magnetically Controlled Distribution Transformer

LIU Chunhui¹, FENG Xinwen², SU Xinyong³, CHEN Haoran¹, CHEN Xinyue¹, CHEN Bochao⁴

(1. State Grid Inner Mongolia East Electric Power Co., Ltd. Electric Power Science Research Institute, Hohhot 010090, China; 2. State Grid Inner Mongolia East Electric Power Co., Ltd., Hohhot 010013, China; 3. State Grid Chifeng Power Supply Company, Inner Mongolia Chifeng 024099, China; 4. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In view of such issues as large voltage fluctuations at the end of long transmission lines and the difficulty of urban power grid expansion, a compact three-phase three dimensional magnetically controlled distribution transformer that combines a controllable reactor with a distribution transformer is proposed. Its working process and advantages are analyzed through theoretical derivation and finite element simulation. The iron core of this compact magnetically controlled distribution transformer consists of three identical single frames, with each phase winding wound on two single frames. Each single frame iron core has a magnetic valve with a smaller cross-sectional area at the upper and lower transverse yokes, and each small cross-sectional iron choke with an air gap is wound with a DC excitation winding. Both theoretical analysis and finite element simulation results show that the compact magnetically controlled distribution transformer, on the condition of maintaining footprint of original power distribution transformer, can not only output reactive power and improve the reactive power and voltage control ability, but also transform voltage and transfer electric energy normally without distortion and imbalance of voltage and current waveforms, which is suitable for urban distribution stations with high proportion of new energy access, high cable utilization rate with limited space.

Key words: magnetic valve; magnetically controlled reactor; distribution transformer; reactive power compensation; voltage fluctuation

0 引言

在新型电力系统中,电源与负荷方面的变化使电压的随机波动性明显增大^[1-3],从而导致系统电压

支撑与调节能力急剧下降;线路方面,由于电缆的大规模应用,容性无功的消耗量也大幅增加,因此,迫切需要感性无功补偿设备来对容性无功进行补偿^[4-6]。

目前,解决由高比例新能源接入电缆化率高且

收稿日期:2026-02-03; 修回日期:2026-05-08

基金项目:国网内蒙古东部电力有限公司电力科学研究院科技项目(SGMDDK00DJJS2200086)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Inner Mongolia East Electric Power Co., Ltd. (SGMDDK00DJJS2200086).

面积有限的城市配网中产生的电压波动及无功补偿等问题,主要有两种方案。

1)传统无功补偿方案。传统无功补偿装置包括以下几种:静止无功补偿器(SVC)、静止无功发生器(SVG)、静止同步补偿器(STATCOM)与磁控电抗器(MCR)。SVC通常使用晶闸管控制电抗器(TCR)及晶闸管投切电容器(TSC)等,并已经广泛投入应用^[7-8]。SVG基于开关速度更快的电力电子全控器件,如IGBT等,拓扑结构一般使用桥式变流器单元,响应速度比SVC有较大的提高,且能连续补偿无功功率^[9]。如果采用先进的控制策略和PWM技术,其谐波含量较SVC也大大降低^[10]。当采用多电平的级联桥式逆变器拓扑结构时,SVG中的变压器可以省去^[11]。由于这些优异性能,SVG正逐渐替代传统的SVC装置。但SVG需要复杂的控制策略^[12-13],且电力电子器件在高电压等级下的不稳定因素仍未完全解决^[14],此外也不能忽视其电力电子器件造价^[15-16]。STATCOM是由电压源型变流器将由IGBT组成的电路经过功率传输设备与电网相连,可控制电路输出交流侧的幅值与相位来使电路的无功电流达到所需的值实现补偿无功功率和谐波电流的双重目标^[17-18]。STATCOM是作为电压稳定的强有力的工具,文[19]提出的链式结构STATCOM相比具有独特优势,但也存在开环响应时间常数大的劣势^[20]。文[21]则进一步提出基于逆系统的解耦PWM控制方法提高其无功响应速度,但需要复杂的控制策略。MCR通常因其无级可调的特点而广泛应用于电力系统当中^[22],中国对于MCR的研究较国外处于领先地位。其中武汉大学陈柏超团队在建立了MCR谐波数学模型的基础上采用粒子群算法和多级磁阀技术有效减少了MCR的谐波含量,且通过并联两个单相MCR使三次谐波幅值进一步减小^[23-24]。文[25]则进一步提出了一种连续式磁阀的MCR,进一步降低了谐波含量。

2)集成变压与无功补偿方案。西安交通大学团队提出了一种将传统变压器和电力电子技术相结合的混合式变压器,他将传统变压器的一部分容量分给电力电子模块用来补偿无功、谐波,具有占地面积小、较电力电子变压器成本较低等优势,但存在可调容量不高的问题^[26]。华中科技大学团队将配电变压器与静止无功补偿器集成一体(DT-STATCOM),可充分利用配电变压器的富余容量实现对变压器及其负载的集中动态补偿,降低了补偿装置的体积和成本;但目前电力电子器件造价较高,且损耗较高^[27]。武汉大学在磁控电抗器的基础上提出了一种新型单相磁控电抗变压器,集普通单相电力变压器与磁控电抗器的功能于一体,具有变压、

动态无功调节、负序电流补偿的功能;但该磁控电抗变压器为单相拓扑结构,不适用于三相电力系统^[28-29]。

针对以上问题,文中提出了一种一体化的紧凑型三相立体式磁控配电变压器(简称紧凑型磁控配电变压器),该拓扑具有变压、无功补偿、动态电压调节的功能,并且较其他无功补偿设备具有更小的占地面积,从而更适用于有高比例新能源接入、电缆化率高且空间有限的城市配电站。

1 拓扑及原理

1.1 拓扑

紧凑型磁控配电变压器的铁心拓扑结构见图1、2。图1中铁心同样由3个完全相同的单框组成,分别为AB、BC、CA单框,其中A相绕组绕制在CA单框和AB单框上,B相绕组绕制在AB单框和BC单框上,C相绕组绕制在BC单框和CA单框上,这种结构可以使得铁心中的磁通更加均匀地分布在3个单框中。每个单框铁心的上下横扼部位都设有截面面积较小的磁阀。3个单框通过6个带气隙的小截面铁扼相连接,从而形成一个整体。每个带气隙的小截面铁扼上都绕有绕制方向相同的直流励磁绕组,因此可以产生方向相同的直流励磁磁通。

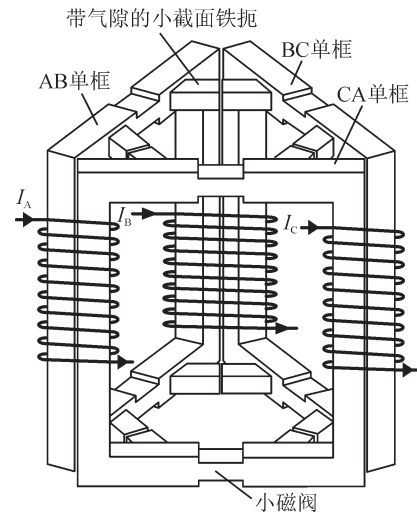


图1 紧凑型磁控配电变压器结构

Fig. 1 Compact magnetically controlled distribution transformer structure

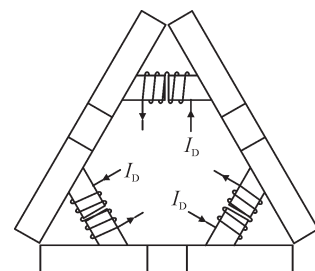


图2 俯视图

Fig. 2 Vertical view

1.2 磁通分布

在紧凑型磁控配电变压器拓扑中,交流绕组和直流绕组的轴线相互垂直,因此可以实现疏耦合状态。同时,在连接各个单框的铁扼上加小气隙,可以进一步阻止交流磁通流向直流绕组所在的铁扼,从而减小对直流绕组的影响。由于直流磁通不会影响交流绕组,因此可以分别对直流励磁部分与交流部分进行分析。

直流磁通分布图见图3。图3中:红色虚线代表绝大部分的直流磁通,蓝色虚线代表少部分流入单框主铁心的直流漏磁通。由于从单框上方流入的直流漏磁通与从下方流入的直流漏磁通方向相反,因此可以相互抵消,从而进一步减小了单框主铁心内流通的直流漏磁通。

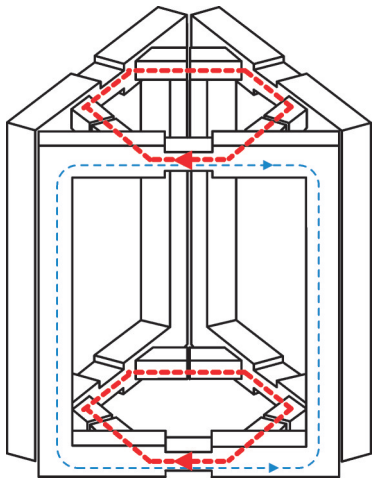


图3 直流漏磁通分布图

Fig. 3 DC leakage flux distribution diagram

对于交流磁通,由于三相对称,且各相的工作原理相同,文中仅以A相为例,取 Φ_A 大于 Φ_B 和 Φ_C 的某一时间段进行分析。

A相磁通分析见图4。

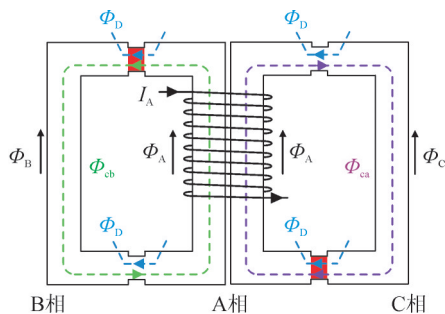


图4 A相磁通分析图

Fig. 4 A-phase magnetic flux analysis diagram

由图4可知,A相绕组包裹的是AB单框与CA单框,因此A相绕组产生的磁通在这两个单框的铁

心内流通。在此时间段内,与A相相关的所有磁通的实际流向均如图4所示:4个直流磁通流向均向左, Φ_{ab} 为逆时针方向, Φ_{ca} 为顺时针方向; Φ_{ab} 与 Φ_b 在左上方磁阀处方向相同,相互叠加致磁阀饱和; Φ_{ca} 与 Φ_c 在右下方磁阀处方向相同,相互叠加致磁阀饱和。因此,对A相来说,在此时间段内,其产生的磁通会流过两个饱和的磁阀,且两个磁阀左右各一个,磁路对称。

任取一个周期内 Φ_A 、 Φ_B 、 Φ_C 的变化曲线见图5,图5中:红色曲线为 Φ_A ;绿色曲线为 Φ_B ;蓝色曲线为 Φ_C 。

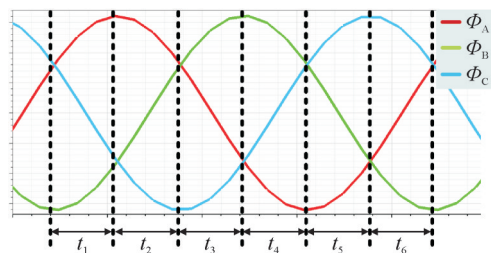


图5 A相磁通数值曲线图

Fig. 5 A-phase magnetic flux numerical curve

同理,一个周期内整个装置所有磁阀的饱和情况依照时间顺序见图6(a)-(f)。图6中,红色铁扼代表在这根铁扼上的磁阀达到磁饱和状态。

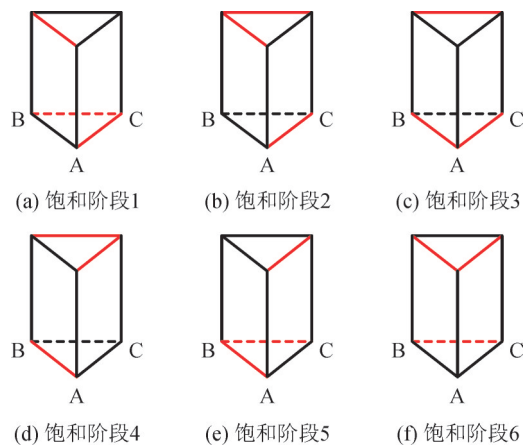


图6 饱和分析结果

Fig. 6 Saturation analysis results

由图4-6可得出以下两个结论:

- 1)在任意时间,整个装置总有3个磁阀达到饱和状态。
- 2)在任意时间,对任意相的磁通回路,其左右两个磁通回路中,总是各有一个磁阀达到饱和状态,所以任意相的磁路对称。

1.3 磁路分析

紧凑型磁控配电变压器等效磁路见图7。

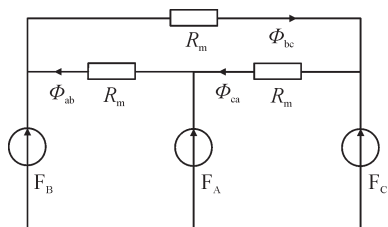


图7 等效磁路

Fig. 7 Equivalent magnetic circuit

通过推导可以得出,A相磁密可表示为

$$B_A(\omega t) = \frac{B_{ab}(\omega t) - B_{ca}(\omega t)}{2} =$$

$$B_{1m} \sin(-\frac{1}{3}\pi) \cos(\omega t + \varphi_1 + \frac{1}{3}\pi) +$$

$$B_{5m} \sin(-\frac{5}{3}\pi) \cos(5\omega t + \varphi_5 + \frac{5}{3}\pi) + \dots \quad (1)$$

紧凑型磁控配电变压器A相的励磁电压与励磁电流分别为:

$$E_A = 2S_1 N_1 \frac{dB_A}{dt} =$$

$$2\omega N_1 S_1 [-B_{1m} \sin(-\frac{1}{3}\pi) \sin(\omega t + \varphi_1 + \frac{1}{3}\pi) -$$

$$5B_{5m} \sin(-\frac{5}{3}\pi) \sin(5\omega t + \varphi_5 + \frac{5}{3}\pi) + \dots] \quad (2)$$

$$I_A = \frac{E_A}{X_{Lm}} = \frac{2\omega N_1 S_1}{X_{Lm}} [-B_{1m} \sin(-\frac{1}{3}\pi) \sin(\omega t + \varphi_1 + \frac{1}{3}\pi) -$$

$$5B_{5m} \sin(-\frac{5}{3}\pi) \sin(5\omega t + \varphi_5 + \frac{5}{3}\pi) + \dots] \quad (3)$$

由式(2)、(3)可知,紧凑型磁控配电变压器的电压与电流均不含有偶次谐波与3次谐波,仅含有少量5次及以上的奇次谐波。

2 有限元仿真与分析

2.1 有限元模型

紧凑型磁控配电变压器的有限元模型见图8。图8中:白色铁心采用30Q130型号硅钢片;绿色绕组为变压器高压绕组,橙色绕组是变压器低压绕组,高压绕组在低压绕组的外侧;蓝色绕组为直流励磁绕组,6个直流励磁绕组产生的直流磁通方向相同;浅绿色绕组为磁通测量绕组,模型中共有两个磁通测量绕组,分别绕制在BC单框的上下磁阀处。紧凑型磁控配电变压器有限元模型外电路图见图9,主要分为变压器一次侧电路、二次侧电路、测量电路3个部分。有限元模型采用Yyn0接线,直流励磁回路的6个励磁绕组均串联接在一起。特别的,测量绕组是为了利用有限元软件准确查看磁阀处的磁通大小而创建的,所接电阻为无穷大,不会对其他绕组产生影响。仿真模型的几何与电气参数见表1。

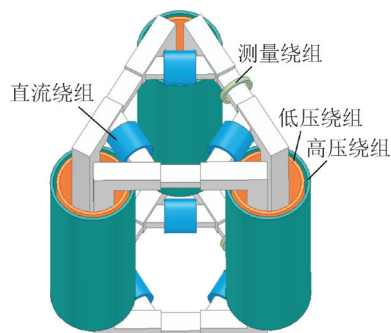


图8 有限元模型

Fig. 8 Finite element model

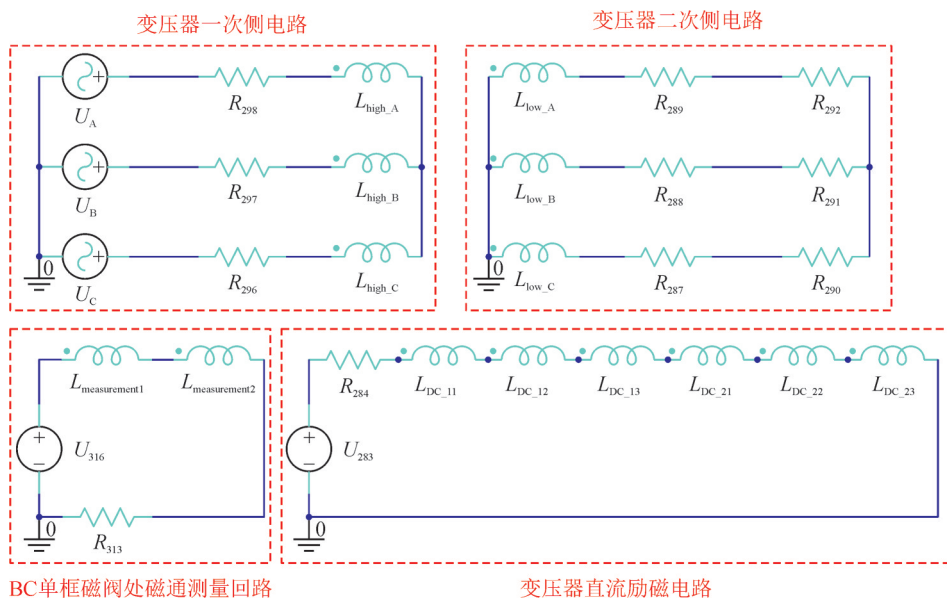


图9 有限元模型

Fig. 9 Finite element model

表1 建模参数

Table 1 Modeling parameters

参数	数值
有功/kVA	630
无功/kvar	120
主铁心柱截面积/m ²	0.172
磁阀铁心柱截面积/m ²	0.086
铁心柱边长/mm	130
磁阀边长/mm	65
磁阀长度/m	0.3
一次侧匝数	988
二次侧匝数	39

2.2 空载仿真

紧凑型磁控配电变压器空载时的直流励磁电流波形见图10。由图10可知,直流励磁电流将随着时间的增长而持续增大,但在0.7 s后不再发生变化。单框铁心的上下两个磁阀的磁感应强度曲线见图11。如图11所示,随着直流励磁电流不断增大,磁阀处的磁饱和程度也在逐渐被抬升至 $\beta=\pi$,最大磁感应强度达到2.2 T。

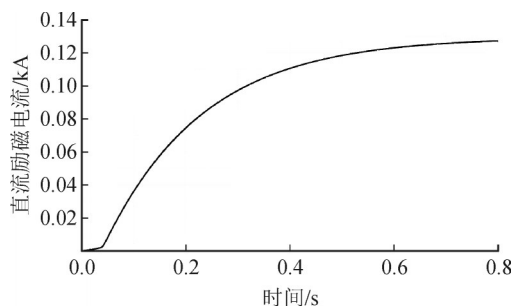


图10 空载时直流励磁电流波形图

Fig. 10 Waveform of DC excitation current at no load

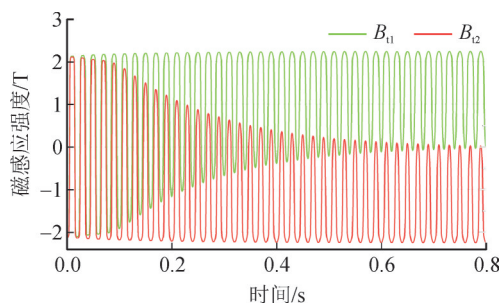


图11 空载时测量到的磁感应强度曲线图

Fig. 11 Magnetic induction intensity curve measured during no-load operation

空载时变压器一二次侧电压比见图12。由图12可知,随着铁心磁饱和程度逐渐增加,紧凑型磁控配电变压器的一二次侧电压比没有明显的变化,约为25.448。经计算,紧凑型磁控配电变压器的一二次侧电压比较匝数比的偏移量仅为0.45%,小于国标要求的0.5%,符合要求。

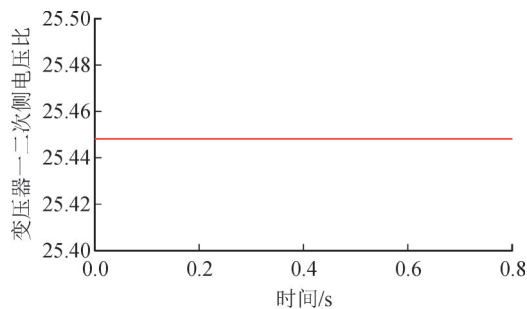


图12 空载时变压器一二次侧电压比

Fig. 12 Voltage ratio between the primary and secondary sides of the transformer during no-load operation

2.3 带额定负载仿真

紧凑型磁控配电变压器带额定负载时的直流励磁电流波形图见图13。由图13可知,直流励磁电流将随着时间的增长而不断增大,但在0.7 s后基本保持稳定。单框铁心的上下两个磁阀的磁感应强度曲线见图14。如图14所示,随着直流励磁电流不断增大,磁饱和程度也在逐渐被抬升至 $\beta=\pi$,最大磁感应强度达到2 T。

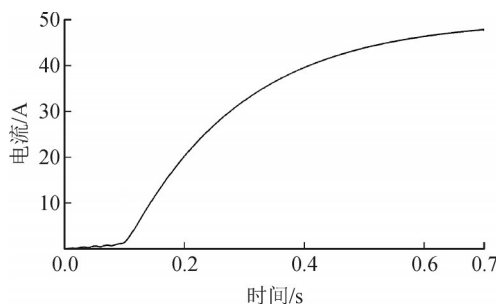


图13 带负载时直流励磁电流波形图

Fig. 13 Waveform of DC excitation current under load

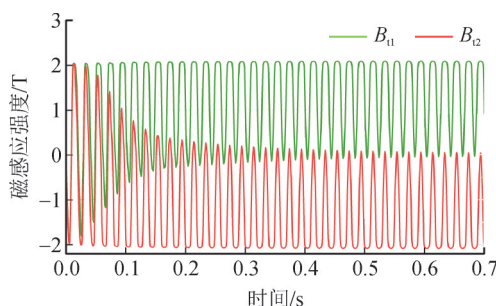


图14 带负载时测量到的磁感应强度曲线图

Fig. 14 Magnetic induction intensity curve measured under load

紧凑型磁控配电变压器有功与无功输出图见图15。图15中黑色曲线与红色曲线分别是磁控配电变压器单相发出的有功功率和无功功率波形图,随着磁阀的磁饱和程度逐渐增大,紧凑型磁控配电变压器的无功功率也逐渐增大,达到额定无功输出时为30 kvar;有功功率略有下降,约下降了2 kW,不影响630 kVA变压器容量。因此,在不影响有功输

出的情况下,调节直流励磁电流的大小可灵活控制变压器输出无功功率的大小。

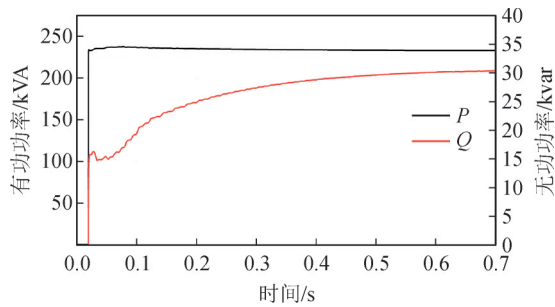


图15 有功与无功输出图

Fig. 15 Active and reactive power output diagram

谐波含量见图16。如图16所示,在磁阀的磁饱和程度达到 $\beta=\pi$ 后,即达到紧凑型磁控配电变压器额定无功输出容量时,其谐波含量非常小,仅为0.38%。

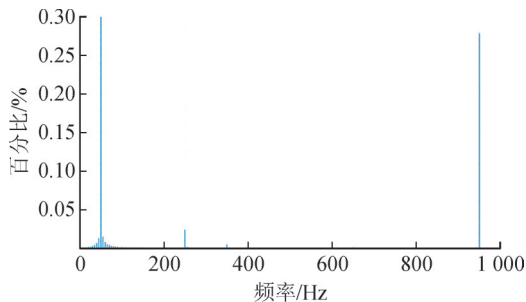


图16 谐波含量

Fig. 16 Harmonic content

3 结论

随着越来越高比例的分布式新能源接入电网中,电缆化率较高的城市配网出现线路末端的电压波动大和控制困难等问题。针对该问题,文中在磁控电抗器与传统变压器的基础上,提出了一种将可控电抗器与配电变压器相结合的紧凑型磁控配电变压器。通过有限元仿真,文中得出的结论如下:

1)紧凑型磁控配电变压器可以在输出无功的同时,正常完成变压与传递电能的工作,且一、二次侧电压比较额定匝数比的偏移量仅为0.45%,小于国标要求的0.5%。

2)紧凑型磁控配电变压器每一相电压、电流波形几乎无畸变与不平衡现象,谐波含量为0.38%,仅含有5次及以上奇次谐波。

综上,紧凑型磁控配电变压器既具有传统配电变压器所具有的升降压的基础功能,也具有灵活调节无功电压的能力,尤其适用于有高比例新能源接入、电缆化率高且空间有限的城市配电网。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 中国特高压交流输电技术创新[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 566-574.
Liu Zhenya. Innovation of UHVAC transmission technology in China[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 566-574.
- [2] 孙海斌, 傅国斌, 宋锐, 等. 面向新型电力系统的静态电压稳定评估方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(2): 9-14.
Sun Haibin, Fu Guobin, Song Rui, et al. Research on static voltage stability evaluation method for new power systems[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(2): 9-14.
- [3] 尚磊, 唐王倩云, 苏适, 等. 构网型无功补偿抑制新能源送端暂态过电压[J]. 电力工程技术, 2024, 43(2): 83-93.
Shang Lei, Tang Wangqianyun, Su Shi, et al. Suppression of transient overvoltage in renewable energy transmission terminal by grid-forming based reactive power compensation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(2): 83-93.
- [4] 卫银忠, 苏嘉彬, 陈斌, 等. 基于SVG动态损耗模型的变电站无功补偿设备协同经济运行策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(12): 177-187.
Wei Yinzong, Su Jiabin, Chen Bin, et al. Cooperative economic operational strategy of substation reactive power compensation equipment based on an SVG dynamic loss model[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(12): 177-187.
- [5] 乔立同, 汪挺, 刘剑宁, 等. 考虑源网荷储协调互动的配电网无功优化[J]. 电测与仪表, 2024, 61(5): 146-151.
Qiao Litong, Wang Ting, Liu Jianning, et al. Distribution network reactive power optimization considering generation network load storage interaction[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(5): 146-151.
- [6] 贺冬珊, 文俊, 杨俊, 等. 高电缆化率对多馈入直流受端电网稳定性的影响研究[J]. 智慧电力, 2025, 53(11): 30-37.
He Dongshan, Wen Jun, Yang Jun, et al. Impact of high cableization ratio on stability of multi-infeed DC receiving-end grids[J]. Smart Power, 2025, 53(11): 30-37.
- [7] Torseng S. Shunt-connected reactors and capacitors controlled by thyristors[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 1981, 128(6): 366-373.
- [8] Olwegard A, Walve K, Waglund G, et al. Improvement of transmission capacity by thyristor controlled reactive power[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100(8): 3930-3939.
- [9] Peng Fangzheng, Lai J S. Dynamic performance and control of a static VAR generator using cascade multilevel inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1997, 33(3): 748-755.
- [10] Peng Fangzheng, Lai J S, McKeever J W, et al. A multilevel voltage-source inverter with separate DC sources for static VAR generation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32(5): 1130-1138.
- [11] Varma R K, Rahman S A, Vanderheide T. New control of PV solar farm as STATCOM (PV - STATCOM) for increasing grid power transmission limits during night and day[J]. IEEE Transactions on

- Power Delivery, 2015, 30(2): 755-763.
- [12] 刘水, 张胜强, 唐伟华, 等. 柔性有载调压变压器电压无功协调控制策略[J]. 电力工程技术, 2024, 43(6): 203-213.
Liu Shui, Zhang Shengqiang, Tang Weihua, et al. Voltage and reactive power coordinated control strategy for flexible on-load tap changer[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(6): 203-213.
- [13] 任彦辉, 宋景龙, 余瑞, 等. 考虑需求侧响应的配电网无功补偿装置协调优化[J]. 智慧电力, 2024, 52(1): 79-86.
Ren Yanhui, Song Jinglong, Yu Rui, et al. Coordinated optimization of reactive power compensation device in distribution network considering on demand-side response[J]. 2024, 52(1): 79-86.
- [14] 赵欣洋, 刘红恩, 陆洪建, 等. 动态无功补偿装置电压调节增益自动优化研究[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(5): 42-51.
Zhao Xinyang, Liu Hong'en, Lu Hongjian, et al. A study on the automatic optimization method of voltage regulation gain of the dynamic reactive power compensator[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(5): 42-51.
- [15] 刘文华, 宋强, 张东江, 等. 50 MVA 静止同步补偿器链节的等价试验[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 73-78.
Liu Wenhua, Song Qiang, Zhang Dongjiang, et al. Equivalent tests of links of 50 MVA STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 73-78.
- [16] 梁旭, 刘文华, 陈建业, 等. 基于多重化逆变器的静止无功发生器直流侧电流分析[J]. 电工技术学报, 2000, 15(1): 52-56.
Liang Xu, Liu Wenhua, Chen Jianye, et al. Analysis of current on DC side of static var generator based on multi inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000, 15(1): 52-56.
- [17] 许湘莲. 基于级联多电平逆变器的 STATCOM 及其控制策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
Xu Xianglian. Research on cascaded multilevel inverter based STATCOM and its control[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [18] 刘钊, 刘邦银, 段善旭, 等. 链式静止同步补偿器的直流电容电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(30): 7-12.
Liu Zhao, Liu Bangyin, Duan Shanxu, et al. DC capacitor voltage balancing control for cascade multilevel STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(30): 7-12.
- [19] 耿俊成, 刘文华, 俞旭峰, 等. 链式 STATCOM 的数学模型[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 66-70.
Geng Juncheng, Liu Wenhua, Yu Xufeng, et al. Modeling of cascade STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 66-70.
- [20] 沈东, 姜齐荣, 韩英铎. 静止同步补偿器的标么化模型及开环响应时间常数分析[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(7): 56-61.
Shen Dong, Jiang Qirong, Han Yingduo. A per-unit STATCOM model and analysis of open loop response time constant[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(7): 56-61.
- [21] 魏文辉, 刘文华, 宋强, 等. 基于逆系统方法有功—无功解耦 PWM 控制的链式 STATCOM 动态控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 23-28.
Wei Wenhui, Liu Wenhua, Song Qiang, et al. Research on fast dynamic control of static synchronous compensator using cascade multilevel inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 23-28.
- [22] 韩焦, 钟高跃, 邹丰, 等. 磁控型可控并联电抗器控制绕组过电压保护研究[J]. 变压器, 2024, 61(5): 35-41.
Han Jiao, Zhong Gaoyue, Zou Feng, et al. Research on control winding overvoltage protection of magnetically controlled shunt reactor[J]. Transformer, 2024, 61(5): 35-41.
- [23] 陈绪轩, 陈柏超, 田翠华, 等. 双级饱和磁控电抗器谐波抑制优化技术[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(5): 71-75.
Chen Xuxuan, Chen Baichao, Tian Cuihua, et al. Optimization technique of harmonic suppression for TSMCR[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(5): 71-75.
- [24] 陈柏超, 田翠华, 梁柏华, 等. 单相可控电抗器的一种谐波抑制原理及实现[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 63-67.
Chen Baichao, Tian Cuihua, Liang Baihua, et al. Principle and implementation of a harmonic depression approach for single-phase controlled saturable reactor[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(3): 63-67.
- [25] 王异凡, 陈国柱, 张曙. 一种连续磁阀式消弧线圈及其数学模型[J]. 电工技术学报, 2014, 29(5): 239-245.
Wang Yifan, Chen Guozhu, Zhang Shu. A continuously magnetic valve arc-suppression coil and its modeling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(5): 239-245.
- [26] Li Hui, Lin Mingyao, Yin Ming, et al. Three-vector-based low-complexity model predictive direct power control strategy for PWM rectifier without voltage sensors[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(1): 240-251.
- [27] 陈志伟, 汪杰, 向念文, 等. 基于新型混合变压器的配电网暂态电压稳定技术研究[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(4): 282-293.
Chen Zhiwei, Wang Jie, Xiang Nianwen, et al. Research on transient voltage stability in distribution networks based on new hybrid transformer[J]. Journal of Electric Power Science And Technology, 2025, 40(4): 282-293.
- [28] 陈柏超, 宋继明, 周俊卫, 等. 紧凑型升压补偿一体化特高压工频耐压试验系统设计[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1719-1725.
Chen Baichao, Song Jiming, Zhou Junwei, et al. Design of compact UHV power-frequency withstand voltage testing system integrated with compensation and boost function[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1719-1725.
- [29] 董宏林, 蔡胜伟, 吴学仕, 等. 500 kV 静态无功补偿专用变压器的运行特性研究、产品研发及工程应用[J]. 变压器, 2026, 63(2): 7-13.
Dong Honglin, Cai Shengwei, Wu Xueshi, et al. Research on the operating characteristics, product development and engineering application of 500 kV static reactive power compensation dedicated transformers[J]. Transformer, 2026, 63(2): 7-13.

刘春晖(1990—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制(通信作者)(E-mail: 455416347@qq.com)。