

电子调压电炉变压器及其控制策略

萧 珺,毛承雄,王 丹,梁 宇,张高言,王元超

(华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘要: 传统电炉变压器中复杂的调压绕组和分接头的频繁动作会严重影响供电可靠性、降低其使用寿命,还会给电网电能质量以及工艺生产质量带来不利影响。提出了一种新型电子调压电炉变压器,利用含有高压绕组、工作绕组和控制绕组的三绕组变压器,以及 3 个相互配合的变换器,对工作绕组输出进行调节,可省略或者大幅减少分接头,同时实现输出电压连续调节,因而可大幅提高供电可靠性和供电电能质量。详细分析了电子调压电炉变压器的拓扑结构,提出了相应的协调控制策略。仿真结果表明了所提电子调压电炉变压器具有良好的性能。

关键词: 电子调压; 电炉变压器; 电能质量; 可靠性; 控制策略

中图分类号: TM 41

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.10.026

0 引言

在大型工业企业中,电炉是重要的工艺装备。电炉冶炼过程中,其负载功率因数低,电流随机变化且富含谐波,随之带来无功冲击和三相严重不平衡,导致附近连接母线电压的不平衡和波动^[1-7]。由于负载阻抗随机变化,甚至可能出现开路或短路状态^[8],从而引起严重的电能质量问题。以咸宁电网为例,电石厂、钢厂等大容量电弧炉负载接入咸宁电网之后,已经诱发了多起电网事故,对咸宁电网的电能质量以及安全稳定运行产生了不可忽视的影响^[9]。

电炉变压器与电炉直接相连并为其提供能量,由于电炉负载特性特殊,电炉变压器的工作方式与电力变压器显著不同。为了满足电炉工作电压范围,电炉变压器二次电压需要由最高值一直调节到最高值的 25%~50%^[10],所需分接头数量多,3 个单相电炉变压器的有载调压档位多达 105 级^[11],调压绕组制造复杂,可靠性低,保护装置设计繁琐^[12];分接头动作频繁,一天内的动作次数可高达 1000 次以上^[13],对分接开关机械寿命和电气寿命要求苛刻,维护工作量大;在调压过程中极易造成操作过电压,需要很高的绝缘水平以避免可能发生的闪络情况^[14-15]。

针对上述电炉变压器的问题,国内外的研究大多集中于分接开关的改造,如采用电力电子开关代替机械开关并采用组合式调压法^[16-17],但此改造并未从电炉变压器整体入手,无法解决调压绕组制造复杂等问题。另外也有一些研究集中于变压器的有载调压方式,如考虑引入动态电压恢复器的功能以实现无触点无级调压^[18-19],但单一的动态电压恢复

器并不能很好地实现有功功率控制,且调压范围有限,也不能有效地解决上述问题。

为了解决机械分接开关调压动作慢、过渡过程不平稳的问题,本文提出了一种新型的电子调压电炉变压器结构,能够良好地实现电压动态无级差调节,同时解决电炉负载的冲击及不平衡直接对电网电能质量造成的影响。

1 电子调压电炉变压器拓扑结构与功能

新型电子调压电炉变压器的三相拓扑结构如图 1 所示。由图 1 可见,电子调压电炉变压器的每一相都包括三绕组变压器、串联变换器、并联变换器和交/直变换器四部分。变压器的 3 个绕组分别为高压绕组、工作绕组和控制绕组,其中,高压绕组与电

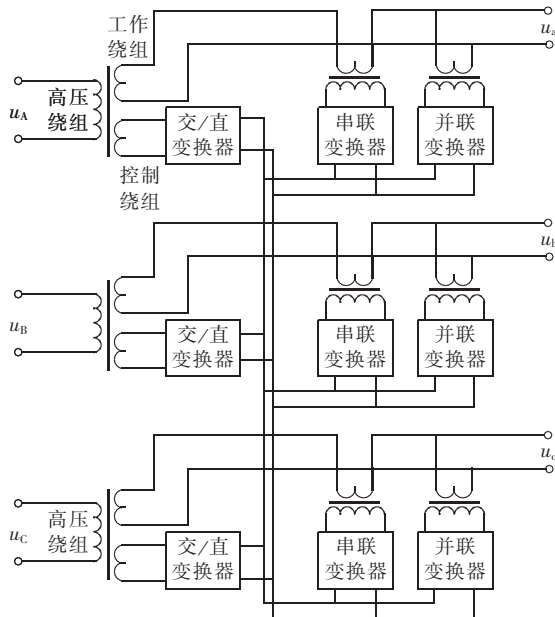


图 1 电子调压电炉变压器拓扑结构

Fig.1 Topology structure of electronic voltage-regulating furnace transformer

收稿日期:2016-09-27;修回日期:2017-07-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277083)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277083)

源相连,工作绕组输出线路与串联变换器、并联变换器依次相连后给电炉供电。交/直变换器的交流侧与对应控制绕组相连,直流侧并联形成公共直流母线,串、并联变换器的直流侧也接在公共直流母线上。

串联变换器可通过调节输出电压对生产质量进行调控,通过对串联变换器交流侧电压的控制实现对输出电压的大范围、快速、无极和连续调节,从而控制电炉变压器按照给定的电压、电流曲线输出,满足电炉设备所需电压、电流要求,有效保障生产质量。同时,串联变换器还能改善电网侧电能质量,当电炉工作产生电压谐波或过电压时,串联变换器可按相输出补偿电网隔离其对电网侧的影响,并使电炉侧实现电压三相平衡。

并联变换器可以辅助输出电流,提高控制绕组通过交/直变换器输送有功功率的效率,避免在串联变换器提供负电压时出现功率环流,同时更加灵活地控制线路中的有功、无功功率流向。由于电炉变压器需要为电炉负载提供相当大的电流,串联变换器、并联变换器共同提供输出电流时可降低变换器容量,从而降低实现难度及工程造价。同时,并联变换器还能对电炉侧的电流谐波、电流不平衡及无功功率进行补偿,同样可起到改善电能质量的作用。

交/直变换器在稳定直流电压的同时,还可以通过控制绕组对电网侧进行一定的无功或谐波电流补偿;由于整个变压器中采用直流母线并联结构,还可实现电网侧电流三相平衡。

2 电子调压电炉变压器建模

在三绕组变压器中,令匝数比为 $N_1:N_2:N_3$,根据磁动势方程,则有:

$$N_0 I_{si} + N_1 I_{si1} + N_2 I_{si2} = N_0 I_0 \quad (1)$$

由于空载励磁电流 I_0 很小,可忽略不计,则式(1)简化为:

$$N_0 I_{si} + N_1 I_{si1} + N_2 I_{si2} = 0 \quad (2)$$

令 $n_1 = -N_1/N_0$ 、 $n_2 = -N_2/N_0$,则式(2)可改写为:

$$I_{si} = n_1 I_{si1} + n_2 I_{si2} \quad (3)$$

其中, I_{si} 、 I_{si1} 、 I_{si2} 分别为三绕组变压器原方电流、工作绕组电流、控制绕组电流。

在工作绕组回路中,等效模型如图 2 所示,由于

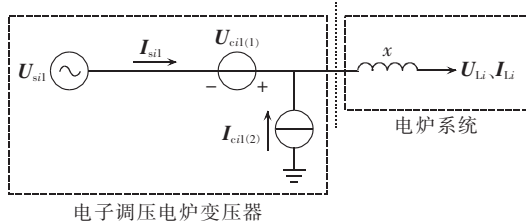


图 2 工作绕组等效模型

Fig.2 Equivalent model of work winding

短网电抗 x 在长度上各相有很大差异,使三相阻抗严重不平衡,造成功率转移和各相的电流、功率不平衡现象^[20],三相电极之间的耦合作用也严重影响三相电极的控制效果^[21],通常考虑分相电压调节,串、并联变换器均采用分相独立控制。

工作绕组中电压、电流关系满足式(4),电压、电流相量图如图 3 所示。

$$\begin{cases} U_{si1} + U_{ci1(1)} = U_{Li} + jxI_{Li} \\ I_{si1} + I_{ci1(2)} = I_{Li} \end{cases} \quad (4)$$

其中, U_{si1} 、 $U_{ci1(1)}$ 、 U_{Li} 分别为三绕组变压器工作绕组电压、串联变换器提供给工作绕组的电压、负载电压; I_{si1} 、 $I_{ci1(2)}$ 、 I_{Li} 分别为三绕组变压器工作绕组电流、并联变换器提供给工作绕组的电流、负载电流。

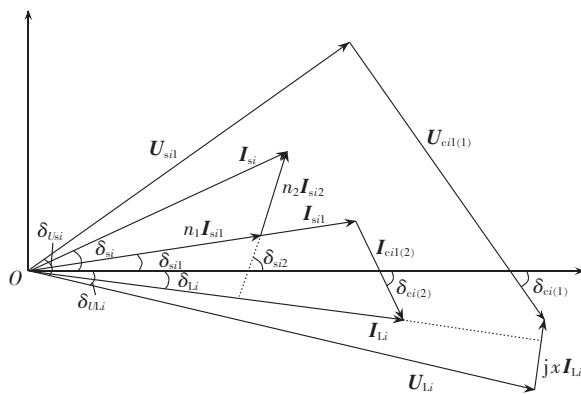


图 3 电压、电流相量图

Fig.3 Phasor diagram of voltages and currents

串联变换器和并联变换器通过共用直流母线联合运行,因此,工作绕组中的有功功率和无功功率流动可根据需要灵活调节。

在串联变换器输出电压为正向时,让串、并联变换器同时承担有功功率输出,以降低串联变换器容量,此时,调节并联变换器电流使串、并联变换器有功功率相等,即:

$$(U_{Li} + jxI_{Li})I_{ci1(2)} = U_{ci1(1)}(I_{ci1(2)} + I_{Li}) \quad (5)$$

考虑并联变换器输出无功功率为 0,则式(5)可变换为:

$$I_{ci1(2)} = \frac{U_{ci1(1)}I_{Li}}{(U_{Li} + jxI_{Li} - U_{ci1(1)})(U_{Li} + jxI_{Li})} (U_{Li} + jxI_{Li}) \quad (6)$$

在串联变换器输出电压为负向时,调节并联变换器电流使并联变换器输出的有功功率等于串联变换器吸收的有功功率,从而避免产生功率环流,提高交/直变换器工作效率,即:

$$(U_{Li} + jxI_{Li})I_{ci1(2)} = -U_{ci1(1)}(I_{ci1(2)} + I_{Li}) \quad (7)$$

同理可变换为:

$$I_{ci1(2)} = \frac{U_{ci1(1)}I_{Li}}{(U_{Li} + jxI_{Li} + U_{ci1(1)})(U_{Li} + jxI_{Li})} (U_{Li} + jxI_{Li}) \quad (8)$$

综合式(6)~(8),并联变换器提供给工作绕组的电流 $I_{ci1(2)}$ 满足:

$$I_{ci1(2)} = \frac{U_{ci1(1)} I_{Li}}{(U_{Li} + jx I_{Li} + U_{ci1(1)}) (U_{Li} + jx I_{Li})} (U_{Li} + jx I_{Li}) \quad (9)$$

由于三相直流母线并联,相间有功功率可以互相流通,在控制绕组中功率关系满足:

$$\sum_{i=a,b,c} P_{si2} = \sum_{i=a,b,c} (P_{ci1(1)} + P_{ci1(2)}) \Rightarrow \sum_{i=a,b,c} U_{si2} I_{si2} = \sum_{i=a,b,c} (U_{ci1(1)} I_{si1} + U_{Li} I_{ci1(2)}) \quad (10)$$

其中, P_{si2} 、 $P_{ci1(1)}$ 、 $P_{ci1(2)}$ 分别为三绕组变压器控制绕组、串联变换器、并联变换器有功功率; U_{si2} 、 I_{si2} 分别为三绕组变压器控制绕组电压、电流。

当电网电压正常时,给定额外约束条件使原方电压、电流三相平衡,因此有:

$$\begin{cases} U_{sa} = U_{sb} = U_{sc} \Rightarrow U_{sa2} = U_{sb2} = U_{sc2} \\ \delta_{U_{sa}} - \delta_{sa} = \delta_{U_{sb}} - \delta_{sb} = \delta_{U_{sc}} - \delta_{sc} = \delta_s \\ I_{sa} = I_{sb} = I_{sc} \end{cases} \quad (11)$$

其中, U_{sa} 、 U_{sb} 、 U_{sc} 为三绕组变压器原方三相电压幅值; U_{sa2} 、 U_{sb2} 、 U_{sc2} 为三绕组变压器控制绕组三相电压幅值; I_{sa} 、 I_{sb} 、 I_{sc} 为三绕组变压器原方三相电流幅值; $\delta_{U_{sa}}$ 、 $\delta_{U_{sb}}$ 、 $\delta_{U_{sc}}$ 为三绕组变压器原方三相电压相角; δ_{sa} 、 δ_{sb} 、 δ_{sc} 为三绕组变压器原方三相电流相角; δ_s 为人为给定功率因数角。

结合式(3)、(4)、(9)—(11)可以求解出每相控制绕组电流 I_{si2} 及原方电流 I_{si} ,即通过将控制绕组作为受控电流源进行调控,从而达到原方三相平衡的目的。

3 仿真分析

根据文献[22-23],型号为 HSPZ7-31500/35 的电炉变压器额定容量为 31500 kV·A,一次侧额定电压为 35 kV,二次额定电压为 201~489 V,分为 19 级有载调压。其中,425~489 V 为恒功率调压,以满足钢水快速升温要求;201~425 V 为恒电流调压,以适应精炼工艺及钢水保温要求。由于电炉工作时,熔化期时间一般为 2 h,精炼期(氧化和还原)时间一般为 1.5 h,分别对应恒功率调压阶段与恒电流调压阶段,即 0~120 min 为恒功率调压,120~204 min 为恒电流调压。负载电压、电流如表 1 所示。

表 1 负载电压、电流
Table 1 Load voltage and current

时间/min	电压/V	电流/kA	时间/min	电压/V	电流/kA
0	489	37.184	156	329	42.792
30	473	38.441	162	313	42.792
60	457	29.787	168	297	42.792
90	441	41.239	174	281	42.792
120	425	42.792	180	265	42.792
126	409	42.792	186	249	42.792
132	393	42.792	192	233	42.792
138	377	42.792	198	217	42.792
144	361	42.792	204	201	42.792
150	345	42.792			

当用传统电炉变压器为电炉设备供电时,系统参数如表 2 所示(变压器漏抗和分级调压均为标么值),分接头动作情况如图 4 所示。

表 2 传统电炉变压器系统参数
Table 2 System parameters of traditional furnace transformer

相别	变压器变比	变压器漏抗	短网电抗/mH	分级调压
A 相	110:1	0.08	3.14	0.08
B 相	110:1	0.08	2.98	0.08
C 相	110:1	0.08	3.14	0.08

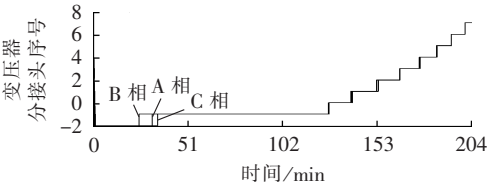
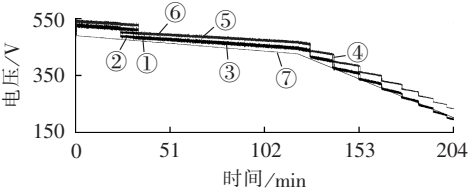
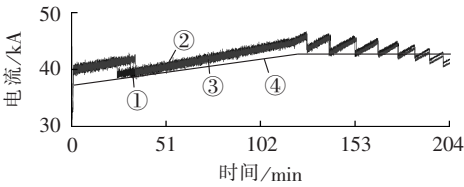


图 4 传统电炉变压器分接头动作情况
Fig.4 Operation of traditional furnace transformer tap changers

由图 4 可看出,由于三相短网电抗不对称,造成三相负载电流有所差别,而电炉变压器的漏抗压降在通过大电流时分压明显,从而导致变压器出口电压差别明显,每相分接头的动作时间也有所差别,与此相对应的电压、电流变化如图 5 所示。



① 负载 A 相, ② 负载 B 相, ③ 负载 C 相
④ 变压器 A 相, ⑤ 变压器 B 相
⑥ 变压器 C 相, ⑦ 负载参考电压
(a) 变压器三相出口电压、三相负载电压与负载参考电压



① A 相, ② B 相, ③ C 相, ④ 参考值
(b) 三相负载电流与负载参考电流

图 5 传统电炉变压器电压、电流变化情况
Fig.5 Changes of voltage and current in traditional furnace transformer

由于变压器漏抗和短网电抗的影响,若直接按电炉负载电压要求对分接头动作情况进行整定,则负载实际电压和预期值会有较大出入。因此,应当适度抬高变压器出口电压,从而使负载实际电压与参考电压差异不大。由于传统变压器对电压进行有级调节,故恒流段期间负载实际电流只能维持在参

考电流附近波动,无法保持恒定值。

当利用电子调压电炉变压器为电炉设备供电时,系统三相参数如表 3 所示(表中变压器漏抗为标么值)。

表 3 电子调压电炉变压器系统参数
Table 3 System parameters of electronic voltage regulating furnace transformer

相别	变压器变比	变压器漏抗	短网电抗/mH
A 相	79:1:14	0.08	3.14
B 相	79:1:14	0.08	2.98
C 相	79:1:14	0.08	3.14

为大容量电炉设备供电时,为了尽可能缩短短网长度,减轻三相短网电抗的不平衡度,改善电炉设备的运行状况,可以采用 3 台单相电炉变压器围绕电炉对称分布,各处电压、电流变化的情况如图 6 所示。

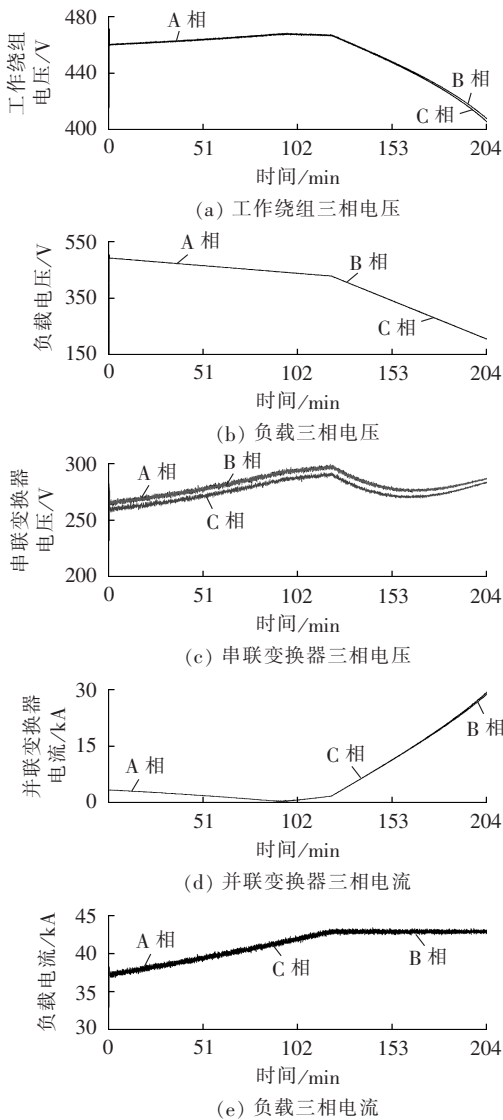


图 6 电子调压电炉变压器电压、电流变化情况

Fig.6 Voltage and current of electronic voltage-regulating furnace transformer

在串、并联变换器和交/直变换器的共同调节下,电炉负载的电压、电流均按工艺要求变化。由于负载电流变化范围较大,三绕组变压器内部漏抗上压降变化较大,导致工作绕组电压不能一直保持为常数。与此相对应,串、并联变换器补偿的电压与电流在不同阶段有不同的变化情况。

变压器内部有功功率流向如图 7 所示。由图 7 可知,当串联变换器输出有功功率时,并联变换器与之共同承担有功功率输出;当串联变换器吸收有功功率时,并联变换器将其吸收的有功功率向负载输出,避免有功功率倒流回控制绕组。因此,并联变换器一方面可以帮助减小串联变换器的容量,另一方面可以提高控制绕组的输出效率。

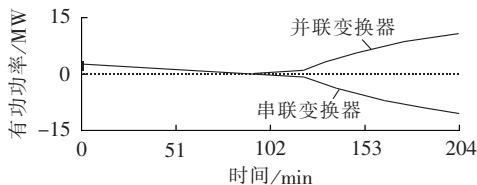
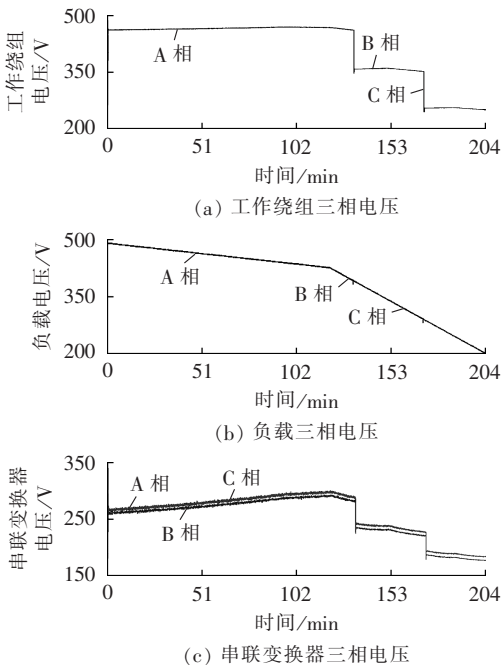
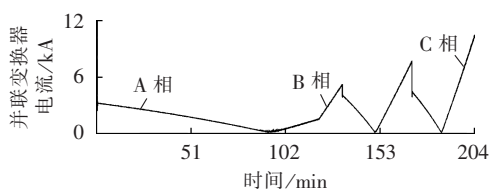


图 7 电子调压电炉变压器有功功率变化情况

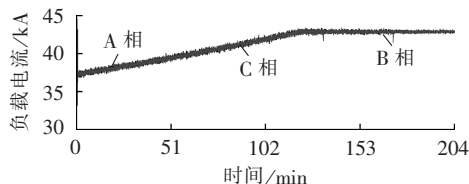
Fig.7 Active power of electronic voltage-regulating furnace transformer

当三绕组变压器变比固定时,由图 6 可看出,由于负载电压、电流变化范围较大,导致串、并联变换器补偿容量相对较大。为了减小串、并联变换器的容量,可在三绕组变压器上加入少量分接头对电压进行粗调,再利用串联变换器进行电压细调。当用含少数分接头的电子调压电炉变压器为电炉设备供电时,分接头动作与电压、电流变化情况如图 8 所示。含少数分接头电子调压电炉变压器内部的有功功率流向如图 9 所示。





(d) 并联变压器三相电流



(e) 负载三相电流

图 8 含分接头电子调压电炉变压器电压、电流变化情况

Fig.8 Voltage and current of electronic voltage-regulating furnace transformer with tap changers

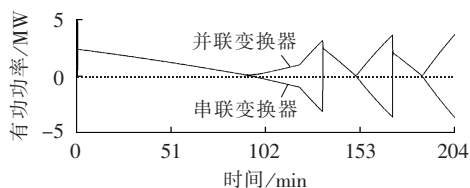
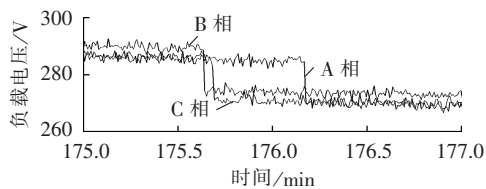


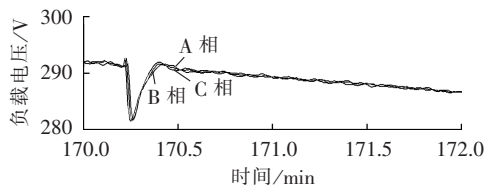
图 9 含分接头电子调压电炉变压器有功功率变化情况

Fig.9 Active power of electronic voltage-regulating furnace transformer with tap changers

对比图 4 与图 8 的分接头动作情况可知,传统电炉变压器需调节 9 次分接头,而对于含分接头的电子调压电炉变压器,分接头仅动作 3 次,动作次数大幅减少。由图 9 可见,当采用分接头进行粗调时,串、并联变换器的容量均大幅减小,采用 3 个分接头时,容量可减小至原容量的 1/3。虽然分接头切换时仍然会对负载电压、电流造成短时冲击(2 种电炉变压器分接头切换对负载电压影响如图 10 所示),



(a) 传统电炉变压器分接头动作时负载电压变化



(b) 含分接头电子调压电炉变压器分接头动作时负载电压变化

图 10 分接头动作对负载电压的影响

Fig.10 Influence of tap changer operation on load voltage

但冲击时长很短,且串联变换器可以在产生电压闪变时稳定电压,稳压效果良好,并不会和传统电炉变压器一样有瞬时电压跳变。增加分接头既可减小成本,又不会对负载造成明显影响,是一种可行的对电子调压电炉变压器进行改良的方案。

4 结论

本文对电子调压电炉变压器拓扑结构进行了描述与分析,建立了其数学模型,通过分析各处电流、电压相量关系和功率流向关系,根据电压、电流相量图和优化条件阐述了控制策略,据此分析了电子调压电炉变压器的可实现性,利用 MATLAB/Simulink 对上述控制策略进行了仿真验证。结果表明,所提结构能满足大型工业企业中电路的智能调压及节能运行的需求。考虑到有效降低成本,可以在三绕组变压器原方增加少量分接头,分接头调节与串联变换器共同调节负载电压使其满足负载需求。该方案大幅降低了串联变换器所需要的容量,同时分接动作次数比常规变压器大幅减少,具有良好的实际应用前景。

参考文献:

- [1] 陈峰,江道灼,周洋,等. 基于故障电流控制的新型 UPFC-FCL 设计[J]. 电力自动化设备,2015,35(12):145-150.
CHEN Feng,JIANG Daozhuo,ZHOU Yang,et al. Design of UPFC-FCL based on fault current control[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(12):145-150.
- [2] 王晓远,高森,赵玉双. 阻性负载下低压故障电弧特性分析[J]. 电力自动化设备,2015,35(5):106-110,118.
WANG Xiaoyuan,GAO Miao,ZHAO Yushuang. Characteristic analysis of low-voltage arc fault in resistive load conditions[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(5):106-110,118.
- [3] 王尧,韦强强,葛磊蛟,等. 基于电弧电流高频分量的串联交流电弧故障检测方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(7):191-197.
WANG Yao,WEI Qiangqiang,GE Leijiao,et al. Series AC arc fault detection based on high-frequency components of arc current[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(7):191-197.
- [4] 刘华东,张定华,唐建宇,等. 抑制电弧炉闪变的 STATCOM 直接电压控制研究[J]. 电工技术学报,2012,27(9):41-47.
LIU Huadong,ZHANG Dinghua,TANG Jianyu,et al. Research on direct voltage control of STATCOM for mitigating electric arc furnaces flicker[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(9):41-47.
- [5] 王昌照,汪隆君,王钢,等. 分布式电源出力与负荷相关性对配电网可靠性的影响分析[J]. 电力自动化设备,2015,35(6):99-105.
WANG Changzhao,WANG Longjun,WANG Gang,et al. Impact of distributed generation output and load correlation on distribution network reliability[J]. Electric Power Automation

- Equipment, 2015, 35(6): 99-105.
- [6] 张懋鲁, 刘玉建. 带串联电容补偿的电炉变压器设计[J]. 变压器, 2012, 49(7): 1-5.
- ZHANG Maolu, LIU Yujian. Design of furnace transformer with series capacitance compensation[J]. Transformer, 2012, 49(7): 1-5.
- [7] 付友, 王宁会, 王志强, 等. 基于噪声信号的电弧炉冶炼氧化镁运行状态分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(5): 15-22.
- FU You, WANG Ninghui, WANG Zhiqiang, et al. Running state analysis of the electric arc furnace smelting magnesium oxide based on the noise signal[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(5): 15-22.
- [8] 许树楷, 宋强, 刘文华, 等. 配电系统大功率交流电弧炉电能质量问题及方案治理研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 93-98.
- XU Shukai, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. Research on the power quality problems and compensation scheme for electric arc furnace in distribution supply system[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(19): 93-98.
- [9] 陈金平, 张弘, 苏红霞, 等. 电弧炉负荷建模及其对电网的影响[J]. 武汉大学学报(工学版), 2014, 47(1): 80-84.
- CHEN Jinping, ZHANG Hong, SU Hongxia, et al. Arc furnace load modeling and its impact on power grid[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2014, 47(1): 80-84.
- [10] 邓茂军, 吴起, 陈亮, 等. 基于电子式互感器的电炉变压器差动保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 114-118, 124.
- DENG Maojun, WU Qi, CHEN Liang, et al. Study of furnace transformer differential protection based on electronic transformer[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 114-118, 124.
- [11] 栗磊, 宋小会, 刘星, 等. 串变调压电炉变压器差动保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 118-121.
- LI Lei, SONG Xiaohui, LIU Xing, et al. Research on differential protection of the furnace transformer which adopts series transformer used for voltage-regulation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 118-121.
- [12] 姚晴林, 李瑞生, 刘星, 等. 电炉变压器成套保护装置研制[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 95-102, 118.
- YAO Qinglin, LI Ruisheng, LIU Xing, et al. Development of microprocessor-based assembly protection equipment for furnace transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 95-102, 118.
- [13] KARANDAEV A S, EVDOKIMOV S A, KHRAMSHIN V R, et al. Information and measuring system for electric arc furnace transformer monitoring [C] // Actual Problems of Electronics Instrument Engineering. Novosibirsk, Russia: [s.n.], 2014: 273-279.
- [14] DIONISE T, JOHNSTON S. Surge protection for ladle melt furnaces[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2015, 21(5): 43-52.
- [15] 张懋鲁. 电炉变压器的操作过电压冲击及其抑制[J]. 工业加热, 2006, 35(1): 45-50.
- ZHANG Maolu. The operating over voltage surge and its suppression of the electric furnace transformer [J]. Industrial Heating, 2006, 35(1): 45-50.
- [16] 王金丽, 李金元, 徐腊元. 大功率电力电子开关用于配电变压器无弧有载调压方案[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(15): 97-102.
- WANG Jinli, LI Jinyuan, XU Layuan. Scheme of arcless on-load voltage regulation for distribution transformer using high power electronic switch [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(15): 97-102.
- [17] 李晓明, 黄俊杰, 尹项根, 等. 平滑无冲击电力电子有载调压装置[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20): 45-48.
- LI Xiaoming, HUANG Junjie, YIN Xianggen, et al. Research on smooth and non-impact power electronics OLTC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20): 45-48.
- [18] 江友华, 顾胜坚, 方勇. 基于电力电子技术的新有载调压变压器[J]. 电力电子技术, 2007, 41(7): 67-68.
- JIANG Youhua, GU Shengjian, FANG Yong. Novel on-load tap-changeable transformer based on power electric technology [J]. Power Electronics, 2007, 41(7): 67-68.
- [19] 姜飞, 涂春鸣, 杨健, 等. 适用于主动配电网的多功能串联补偿器研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 58-66.
- JIANG Fei, TU Chunming, YANG Jian, et al. Multi-function series compensator for active distribution network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 58-66.
- [20] 霍慧芝. 电炉变压器的结构设计探讨[J]. 变压器, 2007, 44(8): 10-12, 24.
- HUO Huizhi. Discussion on structure design of furnace transformer [J]. Transformer, 2007, 44(8): 10-12, 24.
- [21] 鲁军, 霍金彪, 张广跃. 电弧炉电极调节系统的模糊解耦控制器[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 27-33.
- LU Jun, HUO Jinbiao, ZHANG Guangyue. Fuzzy decoupling controller on electrode regulator system of electric arc furnace [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 27-33.
- [22] 桑锋华, 张瑞枫, 张永红, 等. 一台大型电炉变压器的设计[J]. 变压器, 2003, 40(2): 17-21.
- SANG Fenghua, ZHANG Ruifeng, ZHANG Yonghong, et al. Design of large furnace transformer [J]. Transformer, 2003, 40(2): 17-21.
- [23] 赵玉林, 牛泽晗, 李海凤, 等. 具有保护功能的配电变压器无触点有载自动调压分接开关[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 169-175.
- ZHAO Yulin, NIU Zehan, LI Haifeng, et al. Contactless OLTC with protective function for power distribution transformer [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 169-175.

作者简介:



萧 珺

萧 珺(1992—),女,湖北武汉人,硕士研究生,主要研究方向为大型工业企业智能电网、多机系统低频振荡(E-mail:xiaojun9283@163.com);

毛承雄(1964—),男,湖北武穴人,教授,博士,主要研究方向为大型同步发电机励磁控制、大功率电力电子技术在电力系统中的应用、电力系统物理模拟机数模混合仿

真接口系统(E-mail:cxmao@hust.edu.cn);

王 丹(1977—),男,江西瑞昌人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统运行与控制、大功率电力电子技术在电力系统中的应用(E-mail:wangdan@mail.hust.edu.cn)。

(下转第 196 页 continued on page 196)

2009,33(12):112-114.

- [26] WANG Wencong,ZHU Ke,ZHANG Peng,et al. Identification of the faulted distribution line using thyristor-controlled grounding [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2009,24(1):52-60.
- [27] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 2版. 北京:中国电力出版社,2009:46.

作者简介:

朱珂(1977—),男,山东兖州人,副教授,博士,主要研究



朱珂

方向为电力电子在电力系统中的应用(E-mail: sdzshuke@hotmail.com);

王怡轩(1991—),男,山东济南人,工程师,硕士,主要研究方向为电力系统继电保护和电能质量(E-mail:wangbrave@hotmail.com);

倪建(1988—),男,山东潍坊人,工程师,硕士,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail:njhorse123@sina.com)。

Application of active disturbance technology in faulty line selection of arc suppression coil grounding system

ZHU Ke¹,WANG Yixuan²,NI Jian³

(1. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education, Shandong University, Ji'nan 250061, China; 2. State Grid Ji'nan Power Supply Corporation, Ji'nan 250012, China; 3. State Grid Weifang Power Supply Corporation, Weifang 261021, China)

Abstract: A faulty line detection method without additional signal injection device is proposed for arc suppression coil grounding system; when single-phase grounding fault occurs in a feeder, the damping resistor is switched for a short time by power electronic switches connected to arc suppression coil to generate a disturbance current signal with various frequency components, then the faulty line is selected by detecting and analyzing the disturbance current signal in lines. The proposed method requires no additional signal generating device and can be applied under high impedance fault. Theoretical analysis, simulative analysis and laboratory experiments all verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: grounding system; arc suppression coil; active disturbance; faulty line selection; damping resistor

(上接第176页 continued from page 176)

Electronic voltage-regulating furnace transformer and its control strategy

XIAO Jun, MAO Chengxiong, WANG Dan, LIANG Yu, ZHANG Gaoyan, WANG Yuanchao

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The complex voltage-regulating winding and frequent tap changer adjusting of traditional furnace transformer have serious impacts on power supply reliability, reducing its service life and bring adverse effects on power quality and production quality. A novel electronic voltage-regulating furnace transformer is proposed, which adjusts the output of work winding by transformer with high voltage winding, work winding and control winding and three interoperable converters. In this way, the tap changers can be removed or greatly decreased, and the output voltage adjusted continuously, thereby the reliability and quality of power supply are greatly improved. The topology structure of the electronic voltage-regulating furnace transformer is analyzed in detail and its coordination control strategy is proposed. Simulative results show that the proposed electronic voltage regulating furnace transformer has good performance.

Key words: electronic voltage-regulating; furnace transformer; power quality; reliability; control strategy