

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.06.020

柔性有载调压变压器电压无功协调控制策略

刘水¹, 张胜强¹, 唐伟华¹, 王松², 尹靖元²

(1. 广东电网有限责任公司惠州供电局, 广东 惠州 516000;

2. 中国科学院电工研究所, 北京 100190)

摘要:随着可再生能源和电力电子设备在电网中占比不断升高,电压波动也越来越频繁。针对现有配电网调节电压和无功补偿需求,文中设计了一种集成传统变压器和电力电子变换装置的新型柔性有载调压变压器,可同时具备电压调节和无功补偿能力。首先,分析电力电子变换器串联侧和并联侧电压调节、无功补偿原理。然后,考虑有载调压分接开关动作,分别提出基于最小电压幅值和最小有功损耗的串并联电压无功协调控制策略,实现电压连续调节,同时提供最大范围的无功功率。最后,通过仿真和实验验证有载调压变压器的结构合理性和电压无功协调控制策略的正确性。使用柔性有载调压变压器电压无功协调控制策略可实现多种目标下的电压无级调节和无功功率补偿。

关键词:柔性调压装置;有载调压;电力电子变换器;电压无级调节;无功补偿;电力电子变压器

中图分类号: TM72

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)06-0203-11

0 引言

有载调压变压器是提高配电网电压质量的有效手段,在配电网中的应用日益广泛^[1-7]。传统的有载调压变压器可以在带负载的情况下,通过调节变压器分接开关调整输出电压,具有成本低、结构简单、可靠性高等优点。但传统的基于机械式分接开关的有载调压方案通过固定档位进行电压控制,为有级调压;同时机械开关动作速度慢,调压过程中可能产生较大电弧,影响变压器的使用寿命;且不具备无功补偿能力,需要配合无功补偿装置,防止电压失稳^[8-11]。随着新能源大量接入和动态用电负载的快速增长,电网电压波动频繁,甚至有电压越限的可能,传统的有载调压方法逐渐暴露出薄弱环节。

为解决上述问题,基于电力电子技术的有载调压方案成为目前的研究热点之一,其特点是将电力电子器件集成于传统有载调压变压器的可调绕组分接头处^[12-14]。文献[1]给出了一种基于晶闸管的有载调压单元拓扑,并针对多状态下有载调压控制逻辑复杂的问题,提出了一种基于“分层”思想的有载调压控制策略。文献[12]提出了一种基于电子开关的配电变压器有载调压方法,使得调压绕组能力明显提升,解决了由电压偏移造成的变压器硬性损伤问题。文献[15]提出了一种基于电力电子器

件的配电变压器,可实现更加灵活高效的运行方式,但受限于器件性能,无法满足耐压试验要求。文献[16-17]对电力电子开关进行设计以增加可实现的调压级数。文献[18]提出了一种采用电抗式开关的设计思路,有载调压变压器在低压时为电抗式开关,可有效减缓调压过程中的冲击。文献[19]为解决分接开关切换过程中的电压稳定问题,提出了一种基于自适应无载分接开关变压器技术的混合式补偿方法,实现了最优的电压控制。文献[20]针对有载调压变压器中电弧和机械结构复杂的问题,采用一种运行速度高的新型有载分接开关,省去了复杂的机械结构,缩短了调压时间,降低了故障率和成本。文献[21]采用复合开关级联H桥模块作为一种新型有载分接开关,实现了低导通损耗和宽幅无弧调压。上述文献的主要研究思路都是通过改变有载分接开关的拓扑或控制策略,实现有载调压开关的动态特性,但无法实现电压无级调节,也并未提供额外的无功补偿。

基于上述问题,文献[22]提出了一种配电网优化电压控制的方法,使运行电压保持在最佳运行点上,但同样未考虑电压无级调节和无功补偿。文献[23-25]将智能电网引入有载调压,但只给电网电压和无功功率提供故障和数据监测,并没有相应的解决措施。同时针对电力电子变压器,国内外学者研究出了许多拓扑。文献[26]以现有混合配电变压器结构为基础,提出了一种AC/DC/AC式变换器,其具有电能质量综合治理能力,且为其他电气设备提供了直流端口。文献[27-28]研究的是一种级联

收稿日期:2024-04-08;修回日期:2024-07-06

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2021YFB2601602);
中国南方电网有限责任公司科技项目(031300KK52220009)

型电力电子变压器,通过整流级将单相交流电转化为直流电源,然后将稳定的直流电源通过双有源桥变换器(dual active bridge, DAB)模块进行变压处理,起到了电压均衡和功率均衡的效果。文献[29]研究了混合频率电力电子变压器的软开关调制问题,通过单级变换即可实现工频交流到高频交流的转换,但无法实现精准电压调节功能。文献[30]研究了带混合储能装置的电力电子变压器,用于应对电网中的恶劣工况。文献[31]设计了一种 ± 500 kV的对称双极性四环网结构,采用半桥式子模块的模块化多电平换流器、直流断路器和架空线路进行输电。上述文献均围绕混合变压器和电力电子变压器的拓扑展开设计,但未针对性地研究其存在的电压稳定问题和无功补偿问题。

为实现有载调压变压器的连续电压调节,文中提出了一种基于电力电子变换器的柔性有载调压变压器,将部分功率的电力电子变换装置串联接入到电网侧和变压器高压侧,实现对负荷电压的连续调节。相比全功率电力电子变压器,柔性有载调压变压器仅增加了部分功率器件,在增加较小成本的前提下具备电压补偿和无功补偿能力。首先,分析柔性有载调压变压器的无级调压过程中电力电子变换器串联无功的补偿原理;其次,分析电压发生跌落时的串并联协调无功补偿策略;然后,当主变压器变比发生变化时,以补偿电压幅值最小和有功损耗最小为目标,提出了基于最小电压幅值和最小有功损耗的2种控制策略;最后,通过 MATLAB/Simulink 软件进行仿真分析,并研制相关实验样机,验证了文中柔性有载调压变压器拓扑的合理性和控制策略的有效性。

1 柔性有载调压变压器的无级调压过程

1.1 柔性有载调压变压器拓扑

含电力电子变换器的柔性有载调压变压器的单相结构示意图如图1所示。图1中,柔性有载调压变压器由电力电子变换器和有载分接开关组成。电力电子变换器是文中研究的重要部分,负责主要的连续电压调节和无功功率补偿;有载分接开关负责调节变压器的串联绕组,通过改变变压器变比实现有级电压调节。串联侧输出电压 V_c 可以通过隔离变压器与电网电压 V_s 串联,变压器起到调节输出电压的作用;由于取能绕组已经和主绕组隔离,输出电压也可以不通过隔离变压器直接和电网电压串联。文中在高压侧串联接入电力电子变换器,其主要原因为电力电子变换器接入的取能绕组的电

压等级接近每一级的有载分接开关,例如传统有载分接开关每个档位是2.5%,则取能绕组的电压等级即为2.5%的高压侧电压。同时,高压侧电流小,对于电力电子变换器的器件选型更加容易,成本更低。但在高压侧进行调压时,电力电子变换器整体对地绝缘设计需要考虑高压侧的电压等级。

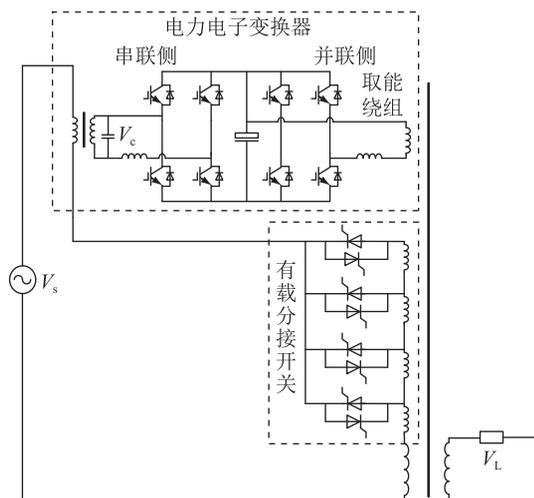


图1 柔性有载调压变压器单相结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of single-phase structure of flexible on-load tap changer

电力电子变换器分为串联侧和并联侧,串联侧的作用是电压无级调节和无功功率补偿,而并联侧的作用是无功功率补偿和支持直流母线电压。文中主要研究柔性有载调压变压器的串联无功补偿原理和串并联协同运行时的控制策略。

假设电网电压不存在电压偏差,柔性有载调压变压器的电力电子变换器可以通过改变串联侧输出电压的相角和幅值,解决负载侧的电压偏差和功率因数问题。

由于有载调压变压器的基本功能是维持电压稳定,因此在设计时功能优先级为:

- (1) 确保二次侧负载电压 V_L 的幅值不变;
- (2) 向电网吸收或发出无功功率,提高电网侧的功率因数。

1.2 电力电子变换器串联无功补偿原理

在分析电力电子变换器的串联无功补偿原理时,将柔性有载调压变压器两边电压均折算至二次侧。图2为折算至二次侧的柔性有载调压变压器的串联无功补偿电压相量示意。

图2中, i_p 为电力电子变换器并联电流; i_{l0} 为负载初始电流; i_l 为补偿后的负载电流; V'_s 为折算后的电网电压幅值,即补偿前的负载初始电压; V'_c 为串联侧折算后的补偿电压幅值; i'_s 为折算后的电网电流; φ 为电力电子变换器串联侧补偿的功率角; β 为

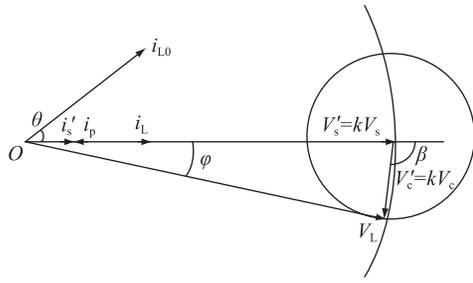


图2 柔性有载调压变压器串联无功补偿的二次侧电压相量示意

Fig.2 Schematic diagram of secondary side voltage vector for series reactive power compensation of flexible on-load tap changer

串联侧发出的补偿电压 V_c 与基准电压(即电网电压 V_s) 之间的夹角; θ 为负载的功率因数角; k 为变压器变比。

根据图2可知,电网电压 V_s 经补偿电压 V_c 补偿后为负载电压 V_L ,如要使柔性有载调压变压器实现网侧单位功率因数补偿,即补偿后的负载电流 i_L 与电网电压 V_s 同相位,应使电力电子变换器串联侧补偿的功率角 φ 与负载的功率因数角 θ 相等。

根据前述条件,补偿前后的负载电压幅值相同,即 V_s 与 V_L 相同。根据三角关系,可以求得图2中电力电子变换器串联侧补偿电压的幅值和相角分别为:

$$V'_c = 2V_L \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1)$$

$$\beta = \frac{\pi}{2} + \frac{\theta}{2} \quad (2)$$

柔性有载调压变压器串联侧在补偿无功功率的同时也会从电网吸收有功功率。根据图2,柔性有载调压变压器串联侧输出的有功功率 P 和无功功率 Q 分别为:

$$P = -V'_c \cos(\pi - \beta) i'_s = -kV_c \cos(\pi - \beta) i_s / k = V_c (\cos \beta) i_s \quad (3)$$

$$Q = V'_c \sin(\pi - \beta) i'_s = kV_c \sin(\pi - \beta) i_s / k = V_c (\sin \beta) i_s \quad (4)$$

式中: i_s 为电网电流。

由式(3)、式(4)可知,改变电力电子变换器串联侧补偿电压的幅值和相角,可以改变串联侧输出的有功功率和无功功率。

相较于电网侧额定电压,当电网电压出现波动偏差时,柔性有载调压变压器要兼顾电压调节和无功补偿2种策略。假设电网电压偏差系数为 μ ,即:

$$V'_s = k_0 V_s = k_0 \mu V_0 = \mu V_L \quad (5)$$

式中: k_0 为变压器额定变比; V_0 为变压器一次侧额定电压幅值。

电网电压存在偏差时,折算至二次侧的柔性有载调压变压器的串联无功补偿电压相量示意如图3所示。

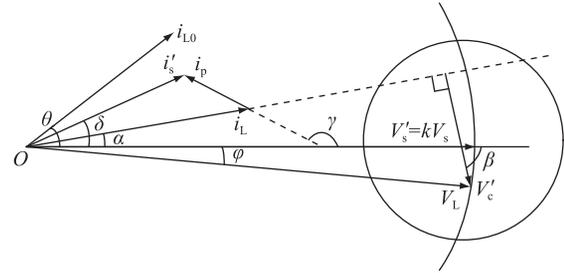


图3 电网电压存在偏差时柔性有载调压变压器串联无功补偿的二次侧电压相量示意

Fig.3 When the grid voltage is deviated, the schematic diagram of secondary side voltage for a flexible on-load tap changer with series reactive power compensation

图3中, δ 为网侧的功率因数角; α 为变压器二次侧的负载电流 i_L 与电网电压 V_s 的相角差; γ 为电网电压 V_s 与补偿电流 i_p 的相角差。同样使补偿后的负载电流 i_L 与电网电压 V_s 同相位,根据三角形余弦定理可以计算得到输出的补偿电压 V'_c 为:

$$V'^2_c = V'^2_L + V'^2_s - 2V_L V'_s \cos \theta \quad (6)$$

引入主变压器变比和偏差系数可得:

$$|kV_c|^2 = V'^2_L (1 + \mu^2 - 2\mu \cos \theta) \quad (7)$$

两边同时开方,得到:

$$V_c = V_L \sqrt{\frac{1 + \mu^2 - 2\mu \cos \theta}{k^2}} \quad (8)$$

根据图3的三角关系,得到 β 为:

$$\beta = \arctan\left(\frac{|V_L| \sin \theta}{|V_L| \sin \theta - |V'_s|}\right) \quad (9)$$

引入主变压器变比和偏差系数可以得到:

$$\beta = \arctan\left(\frac{|V_L| \sin \theta}{|V_L| \sin \theta - |\mu V_L|}\right) = \arctan\left(\frac{\sin \theta}{\sin \theta - \mu}\right) \quad (10)$$

由图3可知,当电网电压出现偏差时,柔性有载调压变压器的电力电子变换器串联侧可以根据式(8)、式(10)输出相应的补偿电压,使得电网以单位功率运行,并使负载电压恢复到电网电压。

1.3 电力电子变换器串并联协调无功补偿策略

在串联侧电压无级调节和无功功率补偿的基础上,进一步增加并联侧无功补偿能力,实现串并联协调无功补偿。

同样将电压、电流相量归算至柔性有载调压变压器的二次侧。制定并联侧无功补偿策略时,若负载功率因数角 θ 较大,则需要补偿的无功功率也较大;反之,若 θ 较小,则需要补偿的无功功率也较小。

设负载的额定电压为 V_{LN} , 假定变换器串联侧能够输出的最大交流电压所对应的有效值为 V_{c-max} , 若 θ 满足式 (11), 则判定负载功率因数角较大。

$$\theta = \arcsin\left(\frac{V_{c-max}}{V_{LN}}\right) \quad (11)$$

若 θ 满足式 (12), 则认为负载功率因数角较小。

$$0 < \theta < \arcsin\left(\frac{V_{c-max}}{V_{LN}}\right) \quad (12)$$

对于以上 2 种情况, 分别进行讨论。

1.3.1 θ 较大时的串并联协同运行策略

在 θ 较大的情况下, 考虑电网电压跌落的轻重, 运行策略也分为以下 2 种情况。

(1) 电压偏差较小时, 折算到低压侧的电网电压 V'_s 满足式 (13), 其串并联协同运行相量示意图 4 所示。

$$\sqrt{V_L^2 - V_{c-max}^2} \leq V'_s \leq V_L \quad (13)$$

式中: V'_{c-max} 为折算后的变换器串联侧能够输出的最大交流电压所对应的有效值。

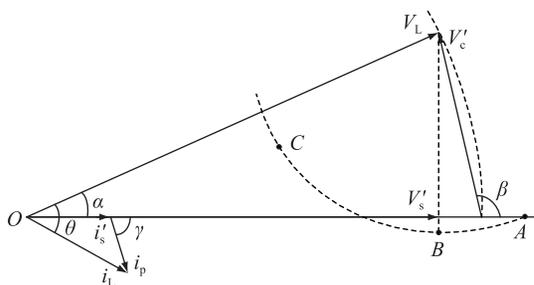


图 4 电压偏差较小时串并联无功补偿的二次侧电压相量示意

Fig.4 Schematic diagram of the secondary side voltage vector for series-parallel reactive power compensation with small voltage deviation

圆弧 ABC 为电网电压 V'_s 从正常电压开始跌落至最大值的集合, 其中 A 点为正常电压时的位置, C 点为最大跌落时的位置, B 点为 V'_s 与 V'_c 垂直时的终点位置。认定 V'_s 的终点在圆弧 AB 段时为轻度跌落, 即电压偏差较小, 在圆弧 BC 段时为重度跌落, 即电压偏差较大。轻度跌落的工况下, 电力电子变换器串联侧从电网吸收能量, 并联侧再回馈能量, 而负载的无功功率由串、并联侧同时提供。

根据图 4 的三角关系, 可以得到变换器串联侧补偿的电压为:

$$\begin{cases} V_c = V_{c-max} \\ \beta = \arccos\left(\frac{V_L^2 + V_s'^2 - V_c'^2}{2V_L V_s'}\right) + \arccos\left(\frac{V_L^2 + V_c'^2 - V_s'^2}{2V_L V_s'}\right) \end{cases} \quad (14)$$

负载电压与电网电压的相角差 α 可以表示为:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{V_L^2 + V_s'^2 - V_c'^2}{2V_L V_s'}\right) \quad (15)$$

此时, 电力电子变换器将电网电流补偿至与电网电压同相位, 实现了电网侧单位功率运行。负载的全部有功功率均来源于电网, 根据能量守恒定律, 可计算电网电流为:

$$i_s = \frac{V_L V_L \cos \theta}{V_s} \quad (16)$$

变换器并联侧输出的电流可以表示为:

$$\begin{cases} i_p = \sqrt{i_L^2 + i_s'^2 - 2i_L i_s' \cos(\theta - \alpha)} \\ \gamma = \pi - \arccos\left(\frac{i_p^2 + i_s'^2 - i_L^2}{2i_s' i_p}\right) \end{cases} \quad (17)$$

综上所述, 当电网电压出现偏差且偏差较小时, 柔性有载调压变压器的电力电子变换器可以根据式 (14) 输出相应的补偿电压, 使得电网侧单位功率运行, 此时并联侧输出电流可由式 (17) 计算得到。

(2) 电压偏差较大时, V'_s 的终点位于圆弧 BC 段上。在此工况下, 电力电子变换器从负载侧吸收有功功率并反馈给电网, 同时向负载提供无功功率, 其相量示意图 5 所示。

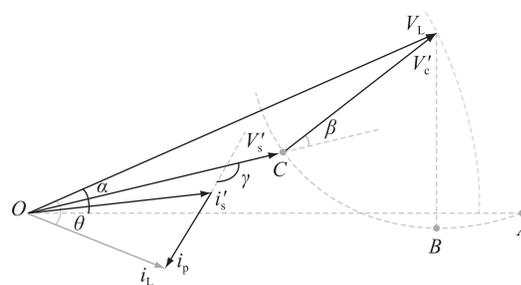


图 5 电压偏差较大时串并联无功补偿的二次侧电压相量示意

Fig.5 Schematic diagram of the secondary side voltage vector of series-parallel reactive power compensation with large voltage deviation

电压跌落的幅度较大时, 为维持电压稳定, 变换器串联侧主要参与电压的无级调节, 对无功功率补偿的作用很小, 而此时变换器并联侧无功功率补偿的能量可能不足。为使补偿后的网侧功率因数角 δ 尽可能接近 0, 以实现网侧单位功率运行, 可设定 δ 的范围为 $0 \sim \delta_{max}$, δ_{max} 为网侧功率因数角的最大允许值。随着 δ 减小, 电力电子变换器向电网侧输入的有功功率将增加。变换器串联侧输出的电网电压幅值、相角同式 (14); 负载电压与电网电压的相角差 α 同式 (15)。综合考虑功率因数及有功功率交换的 2 种因素, 变换器并联侧可以根据相角差 α 决定补偿后的网侧功率因数角 δ 。若 α 满足式 (18), 则补偿后电网电流 i_s 的方向与 OB 段相同, 此

时 δ 如式(19)所示。

$$\alpha \geq \arcsin\left(\frac{V'_c}{V_L}\right) - \delta_{\max} \quad (18)$$

$$\delta = \arcsin\left(\frac{V'_c}{V_L}\right) - \delta_{\max} \quad (19)$$

若:

$$\alpha < \arcsin\left(\frac{V'_c}{V_L}\right) - \delta_{\max} \quad (20)$$

此时电网侧的功率因数角为最大允许值,根据能量守恒定律,补偿后的电网电流为:

$$i_s = \frac{V_L i_L \cos \theta}{V_s \cos \delta} \quad (21)$$

进而得到变换器并联侧输出的电流为:

$$\begin{cases} i_p = \sqrt{i_L^2 + i_s'^2 - 2i_L i_s' \cos(\theta - \alpha - \delta)} \\ \gamma = \pi - \arccos\left(\frac{i_p^2 + i_s'^2 - i_L^2}{2i_p i_s'}\right) - \delta \end{cases} \quad (22)$$

综上所述,当电网电压出现偏差且偏差较大时,柔性有载调压变压器的电力电子变换器并联侧输出的电流可以由式(22)表示。当对变换器串联侧输出的补偿电压进行电压调节时,并联侧主要进行无功功率的调节。

1.3.2 θ 较小时的串并联协同运行策略

当功率因数角 θ 较小时,柔性有载调压变压器的相量示意如图6所示。

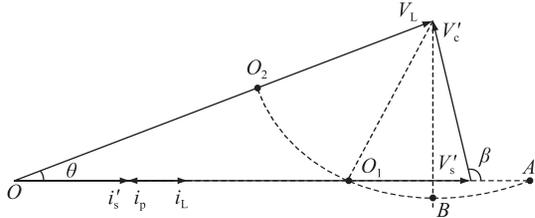


图6 功率因数角为 θ 较小时串并联无功补偿的二次侧电压相量示意

Fig.6 Schematic diagram of secondary side voltage vector for series-parallel reactive power compensation at small power factor angle θ

当电网电压未出现跌落,即 V'_s 的终点位于 O_1A 段时,负载所需的无功功率全部由串联侧补偿。根据三角关系, V'_s 满足:

$$V_L \cos \theta - \sqrt{V_{c-\max}'^2 - (V_L \sin \theta)^2} \leq V'_s \leq V_L \quad (23)$$

此时串联侧所注入的电压幅值和相角为:

$$\begin{cases} V'_c = \sqrt{V_L^2 + V_s'^2 - 2V_L V_s' \cos \theta} \\ \beta = \pi - \arccos\left(\frac{V_s'^2 + V_c'^2 - V_L^2}{2V_s' V_c'}\right) \end{cases} \quad (24)$$

此时变换器并联侧的作用主要是维持直流母线电压恒定,因此其补偿的电流为:

$$|i_p| = |i_L - i_s'| = i_L |1 - V_L / (V'_s \cos \theta)| \quad (25)$$

当 V'_s 位于圆弧 AB 段时,并联侧补偿电流 i_p 与电网电流 i_s 同相位;若位于 O_1B 段,则相位相反。当 V'_s 终点在圆弧 O_1O_2 段上时, V'_s 满足:

$$V'_0 - V_L \leq V'_s \leq V_L \cos \theta - \sqrt{V_{c-\max}'^2 - (V_L \sin \theta)^2} \quad (26)$$

式中: V'_0 为折算后的电网一次侧额定电压。

此时电力电子变换器的串联侧和并联侧同时为负载提供无功功率。电力电子变换器向负载注入的电压和电流的幅值、相角同式(14)、式(22)。

2 计及有级调压的串并联电压调节和无功补偿协调控制策略

柔性有载调压变压器的控制目标是电压无级调节与无功功率补偿,在实际运行中,变压器的分接开关会根据负载的需要进行动作。文中考虑主变压器的分接开关动作后电力电子变换器串并联侧的协同控制策略。

为方便后续描述与计算,将柔性有载调压变压器的主变压器两侧电压、电流均折算至二次侧,令主变压器的实际变比为 k ,额定变比为 k_0 ,则:

$$\varepsilon = k/k_0 \quad (27)$$

式中: ε 为档位系数,存在取值范围,在后续计算时,将 ε 定义为连续变量。

考虑主变压器实际变比 k 可变时,折算至主变压器二次侧的相量示意如图2所示,可知在负载阻抗不变的情况下,其补偿后的负载电压和负载电流不变,但由于主变压器的实际变比 k 改变,折算后的电网电压 V'_s 与柔性有载调压变压器的串联补偿电压 V'_c 扩大 ε 倍。

根据图2的相量关系,可以得到柔性有载调压变压器串联侧补偿电压 V'_c 的表达式为:

$$(kV_c)^2 = V_L^2 + (kV_s)^2 - 2V_L(kV_s) \cos \theta \quad (28)$$

将式(28)等式两边同时乘以主变压器额定变比的平方 k_0^2 ,折算至二次侧,并引入偏差系数,即:

$$\begin{aligned} (k_0 k V_c)^2 &= \\ (k_0 V_L)^2 + (k_0 k V_s)^2 - 2(k_0 V_L)(k_0 k V_s) \cos \theta &= \\ (k_0 V_L)^2 + (k_0 k \mu V_0)^2 - 2(k_0 V_L)(k_0 k \mu V_0) \cos \theta &= \\ V_L^2 [k_0^2 + (k\mu)^2 - 2kk_0 \mu \cos \theta] & \quad (29) \end{aligned}$$

将式(29)等式两边同时除以 $(kk_0)^2$,引入主变压器档位系数 ε ,可得:

$$\begin{aligned} V_c^2 &= V_L^2 \left[\left(\frac{1}{k}\right)^2 + \left(\frac{\mu}{k_0}\right)^2 - \frac{2\mu \cos \theta}{kk_0} \right] = \\ V_L^2 \left[\left(\frac{1}{\varepsilon k_0}\right)^2 + \left(\frac{\mu}{k_0}\right)^2 - \frac{2\mu \cos \theta}{\varepsilon k_0^2} \right] & \quad (30) \end{aligned}$$

$V_c > 0$, 对式(30)开根化简可得:

$$V_c = V_0 \sqrt{\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^2 + \mu^2 - \frac{2\mu \cos \theta}{\varepsilon}} \quad (31)$$

此时补偿电压相角 β 为:

$$\beta = \arctan\left(\frac{V_L \sin \theta}{V_L \sin \theta - V'_s}\right) \quad (32)$$

引入主变压器实际变比 k 、偏差系数 μ 和分接开关档位系数 ε 可得:

$$\beta = \arctan\left(\frac{\sin \theta}{\sin \theta - \varepsilon \mu}\right) \quad (33)$$

$$|i_p| = |i_c - i'_s| = i_L \left| 1 - \frac{V_L}{\varepsilon V'_s \cos \theta} \right| \quad (34)$$

在满足柔性有载调压变压器的首要控制目标, 即维持负载电压稳定不变的前提下, 可知负载电流的幅值和相角也不变。从式(29)一式(34)可以看出, 分接开关动作后, 主变压器的实际变比 k 改变会影响到电力电子变换器的补偿电压。

在无功补偿策略的控制中, 将主变压器的实际变比 k 增大, 可减小电力电子变换器的补偿电压幅值 V_c , 从而等效增大柔性有载调压变压器的串联无功补偿范围。

2.1 基于最小电压幅值的串并联电压无功协调控制策略

由上述可知, 控制主变压器的实际变比 k 可以调节电力电子变换器串联侧输出的补偿电压 V_c , 当 V_c 最小时, 补偿范围可以最大。

图2中, 当补偿电压与负载电压呈 $\pi/2$ 夹角时, 根据三角形关系, 补偿电压幅值最小, 此时其相角 $\beta = \pi/2 + \theta$ 。而电力电子变换器并联侧的作用是从电网吸收有功功率, 以支撑直流母线电压, 补偿串联侧的有功功率损耗。

柔性有载调压变压器基于最小电压幅值的串并联电压无功协调控制策略如下。

首先, 计算柔性有载调压变压器的最优档位系数。 $\beta = \pi/2 + \theta$, 根据三角形关系可知:

$$k V_s \cos \theta = V'_s \cos \theta = V_L \quad (35)$$

引入电网电压偏差系数 μ :

$$k = \frac{V_L}{V_s \cos \theta} = \frac{k_0 V_L}{\mu k_0 V_0 \cos \theta} = \frac{k_0}{\mu \cos \theta} \quad (36)$$

得到:

$$\varepsilon' = \frac{1}{\mu \cos \theta} \quad (37)$$

然后根据最优档位系数 ε' 计算柔性有载调压变压器串联侧输出的补偿电压和并联电流。将上述所得装置的最优档位系数 ε' 代入式(31)、式

(33)、式(34)可得:

$$\begin{cases} V_c = V_0 \sqrt{\left(\frac{1}{\varepsilon'}\right)^2 + \mu^2 - \frac{2\mu \cos \theta}{\varepsilon'}} \\ \beta = \arctan\left(\frac{\sin \theta}{\sin \theta - \varepsilon' \mu}\right) \\ |i_p| = |i_c - i'_s| = i_L \left| 1 - \frac{\mu V_L}{V'_s} \right| \end{cases} \quad (38)$$

从式(35)一式(38)可以看出, 柔性有载调压变压器可以通过调节分接开关改变主变压器的实际变比 k , 从而改变分接开关的档位系数 ε , 使得柔性有载调压变压器串联侧输出的补偿电压幅值最小, 电力电子变换器无功补偿范围最大, 此时变换器并联侧输出的补偿电流起到了吸收有功功率、维持装置的直流母线电压恒定的作用。

2.2 基于最小有功损耗的串并联电压无功协调控制策略

电力电子变换器的并联侧主要起到无功功率补偿、从电网吸收有功功率、支撑直流母线电压以及补偿串联侧有功功率损耗的作用。柔性有载调压变压器通过控制主变压器实际变比 k 及补偿电压相角 β , 可以使得变换器串联侧输出的补偿电压与负载电流方向垂直, 此时变换器串联侧输出电压所吸收的有功功率为 0, 减少了串联侧的有功损耗, 变换器并联侧需要补偿的有功功率减少, 从而等效提升了变换器并联侧的无功补偿能力, 实现了柔性有载调压变压器更大范围的无功补偿。

柔性有载调压变压器基于最小有功损耗的控制策略折算至二次侧的相量示意图如图7所示。

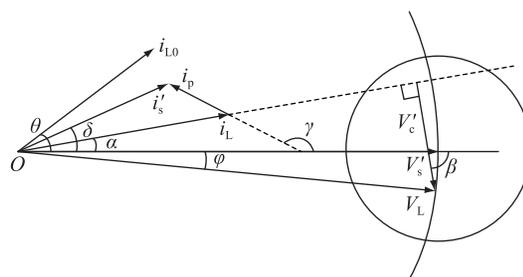


图7 基于最小有功损耗的控制策略的相量示意
Fig.7 Schematic diagram of control strategy based on minimum active loss

由图7可知, 变换器串联侧输出的补偿电压 V'_c 与负载电流 i_L 呈 $\pi/2$ 夹角时, 电压 V'_c 产生的补偿功率均为无功功率, 此时 β 可以由三角形正弦定理得到:

$$V'^2_c = V^2_L + V'^2_s - 2V_L V'^2_s \cos\left(\theta + \beta - \frac{\pi}{2}\right) \quad (39)$$

引入主变压器实际变比 k 、偏差系数 μ 和分接

开关档位系数 ε 可得:

$$V_c = V_0 \sqrt{\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^2 + \mu^2 - \frac{2\mu \sin(\theta + \beta)}{\varepsilon}} \quad (40)$$

同时根据余弦定理,可得变换器并联侧输出的电流为:

$$\begin{cases} i_p = \sqrt{\frac{i_s^2}{\varepsilon^2} + i_L^2 - \frac{2i_s' i_L}{\varepsilon} \cos(\delta - \alpha)} \\ \gamma = \pi - \arccos\left(\frac{\varepsilon^2(i_p^2 - i_L^2) + i_s'^2}{2i_p i_s \varepsilon}\right) - \delta \end{cases} \quad (41)$$

柔性有载调压变压器基于最小有功损耗的串并联协同无功补偿控制策略如下。

假定柔性有载调压变压器能实现单位功率因数的补偿,此时负载电流 i_L 与电网电压 V_s 同相位, $\beta = \pi/2$ 。根据直角三角形关系,有:

$$\varepsilon' = \frac{\cos \theta}{\mu} \quad (42)$$

将式(42)计算得到的档位系数代入式(31)、式(33)、式(41),可得:

$$\begin{cases} V_c = V_0 \sqrt{\left(\frac{1}{\varepsilon'}\right)^2 + \mu^2 - \frac{2\mu \sin(\theta + \beta)}{\varepsilon'}} \\ \beta = \arcsin\left(\frac{\cos \theta}{\varepsilon' \mu}\right) \\ i_p' = \sqrt{\frac{i_s^2 \mu^2}{\cos^2 \theta} + i_L^2 - \frac{2i_s' i_L \mu \cos(\delta - \alpha)}{\cos \theta}} \\ \gamma = \pi - \arccos\left(\frac{(i_p^2 - i_L^2) \cos^2 \theta + \mu^2 i_s'^2}{2i_p i_s \mu \cos \theta}\right) - \delta \end{cases} \quad (43)$$

由式(43)可知,柔性有载调压变压器可以通过改变主变压器的分接开关控制实际变比 k 为最优值,使电力电子变换器串联侧输出的补偿电压产生的有功损耗最小,此时并联侧所需要补偿的有功功率最小,等效提高了其无功补偿范围。

在上述计算中,档位系数为连续变量。而在实际变压器中,调节变比的档位数 n 为整数,档位系数应为离散变量,可调变比的百分比为 a ,则有:

$$\varepsilon = \frac{k}{k_0} = 100\% \pm n \times a \quad (44)$$

计算得到最优档位系数 ε' 后,应当根据最优档位系数选择最优实际档位系数 ε_L 。

3 仿真分析

使用 MATLAB/Simulink 软件对柔性有载调压变压器的电压无功协调控制策略进行仿真分析。

以柔性有载调压变压器基于最小电压幅值的

控制策略为例,搭建基于最小电压幅值的电压无功补偿控制仿真实验平台。系统参数设置如下:阻感负载中电阻和电感分别为 1Ω 、 1.5 mH , $\cos \theta = 2\sqrt{5}/5$;柔性有载调压一次侧电压为 10 kV ,低压侧电压为 400 V ;柔性有载调压变压器的有级调节档位中每 5% 为一个档位, $\pm 4 \times 5\%$ 共 9 个档位;电力电子变换器输出补偿电压的最大值为 2 kV ,开关频率为 10 kHz ,采样时间 T_s 为 $1 \times 10^{-5} \text{ s}$ 。实验所得仿真波形如图 8 所示。

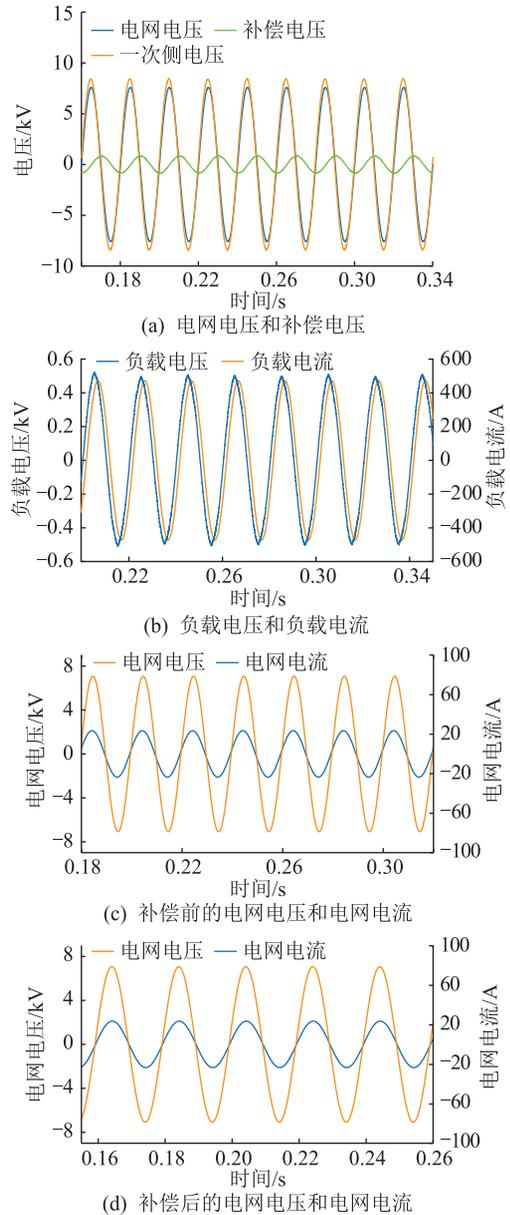


图 8 基于最小电压幅值的串并联无功补偿协调控制仿真波形

Fig.8 Simulated waveforms of series-parallel reactive power compensation coordinated control based on minimum voltage amplitude

图 8(a)为柔性有载调压变压器的电网电压、变压器一次侧端口电压与补偿电压的波形图,可以看

出,柔性有载调压变压器可以补偿负载电压的偏差及无功功率。图 8(b)为负载电压和电流的波形图,可以看出,负载电压和电流之间存在相角差。图 8(c)、(d)分别为补偿前、后电网电压与电网电流的波形图,补偿后可以实现单位功率因数并网。

同理,根据基于最小有功损耗的串并联电压无功补偿控制策略搭建仿真平台。柔性有载调压变压器档位可调时,得到的仿真波形如图 9 所示。

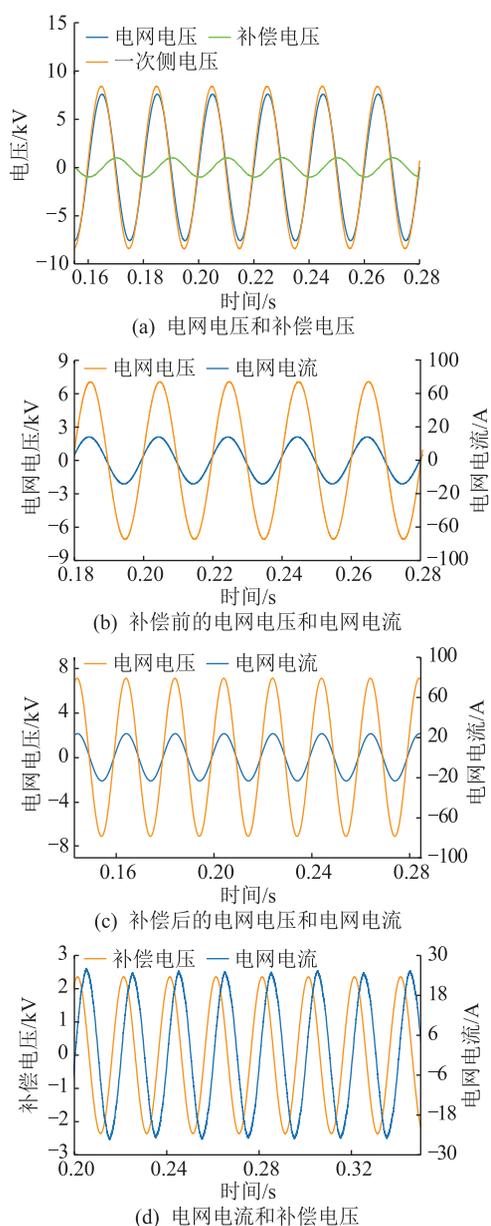


图 9 基于最小有功损耗的串并联无功补偿协调控制仿真波形

Fig.9 Simulated waveforms of series-parallel reactive power compensation coordinated control based on minimum active loss

图 9(a)为柔性有载调压变压器补偿电压、电网电压与变压器一次侧端口电压的波形图,可以看出,基于最小有功损耗的控制策略可以补偿负载电

压的偏差和无功功率。图 9(b)、(c)分别为补偿前、后电网电压与电网电流的波形图,补偿后可以实现单位功率因数并网。图 9(d)为基于最小有功损耗的串并联电压无功补偿控制策略下的补偿电压和电网电流波形图,在此控制策略下,补偿电压和电网电流的相角差为 $\pi/2$,此时电力电子变换器所需的有功功率最小。

传统机械调压和柔性有载调压变压器无级调压对比仿真波形如图 10 所示。

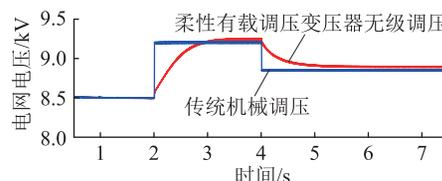


图 10 传统机械调压和柔性有载调压变压器无级调压对比仿真波形

Fig.10 Comparison simulation waveforms of traditional mechanical voltage regulation and flexible on-load tap changer stepless voltage regulation

由图 10 可知,传统的机械调压只能按照固定的档位进行调节,精准度较差,而柔性有载调压变压器可以按照需求进行无级调节,更加灵活且精准。

4 实验验证

实验室搭建了一个按比例缩减平台,实验平台参数如表 1 所示。

表 1 柔性有载调压变压器实验平台参数
Table 1 Flexible on-load tap changer experimental platform parameters

参数	数值
电网额定电压/kV	1
负载电压/V	400
变压器额定变比	0.4
直流母线电压/V	400
补偿电压最大值/V	100
直流电容/mF	2
滤波电感/mH	0.9
滤波电容/ μ F	35
电力电子变换器开关频率/kHz	10
负载电阻/ Ω	10
负载电感/mH	10

在此平台上完成柔性有载调压变压器无级调压实验,如图 11 所示,通过柔性有载调压变压器电压无功协调控制策略实现变压器二次侧电压的无级调节,从而实现负载电压的稳定控制。

柔性有载调压变压器的最小电压幅值控制策

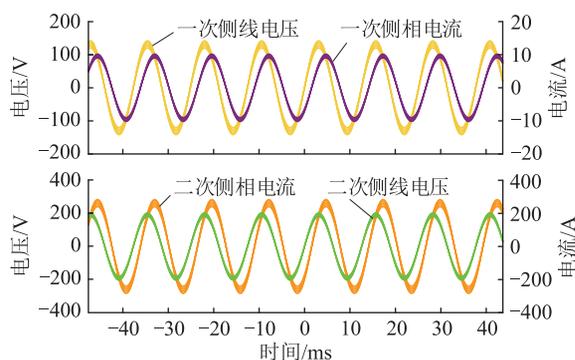


图 11 柔性有载调压变压器无级调压实验波形

Fig.11 Experimental waveforms of stepless voltage regulation for flexible on-load tap changer

略的实验波形如图 12 所示,可知柔性有载调压变压器能够通过产生一个较小的电压补偿相量来实现一次侧电压的相角控制,此时变压器补偿电压与电网电压的相角差接近 $\pi/2$ 。柔性有载调压变压器通过调整主变压器的变比来保证负载电压幅值的稳定。

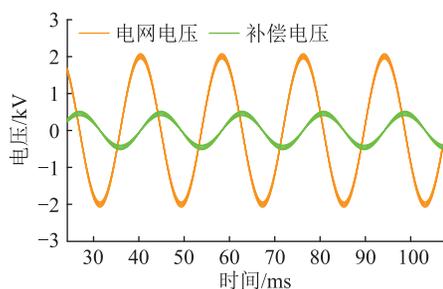


图 12 最小电压幅值控制策略实验波形

Fig.12 Experimental waveforms of minimum voltage amplitude control strategy

柔性有载调压变压器最小有功损耗实验波形如图 13 所示。

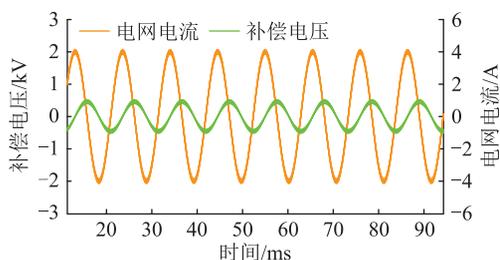


图 13 最小有功损耗控制策略实验波形

Fig.13 Experimental waveforms of minimum active loss control strategy

由图 13 可知,电力电子变换器的串并联无功补偿功能可以实现一次侧电压的相角控制,同时柔性有载调压变压器通过调整主变压器的变比来维持负载电压幅值的稳定。可以看出,当网侧功率因数为 1 时,补偿电压与电网电流之间的角度接近 $\pi/2$,

此时电力电子变换器输出的有功功率最小,实现了最小有功损耗的控制策略。

5 结语

针对传统的有载调压装置电压无级调节和无功补偿能力不足的问题,文中采用集成电力电子装置的柔性有载调压变压器,实现了配电网电压连续调节和无功综合补偿。通过分析柔性有载调压装置的电压调节和无功补偿原理,提出了基于最小电压幅值和最小有功损耗的电压无功协调控制策略。最小电压幅值控制策略通过保证电力电子变换器串联侧输出的补偿电压幅值最小,实现无功补偿范围最大化;最小有功损耗控制策略通过保证电力电子变换器串联侧有功损耗最小,减少并联侧有功功率,在减少系统损耗的同时等效提高无功补偿范围。结合电压无功协调控制策略,定量给出了柔性有载调压变压器的最大功率因数角的补偿范围,保证限定条件下的单位功率因数并网。最后,通过仿真平台和实验样机,验证了柔性有载调压变压器的连续电压调节和无功补偿功能,以及电压无功多目标协同调控能力。

参考文献:

- [1] 王子凌,周金辉,陈铭,等. 计及有载调压的高光伏渗透率配电网储能优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报,2020,32(8):123-129,137.
WANG Ziling,ZHOU Jinhui,CHEN Ming, et al. Optimal configuration of energy storage for high PV permeability distribution network with on-load voltage regulation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2020,32(8):123-129,137.
- [2] 李子欣,高范强,赵聪,等. 电力电子变压器技术研究综述[J]. 中国电机工程学报,2018,38(5):1274-1289.
LI Zixin,GAO Fanqiang,ZHAO Cong, et al. Research review of power electronic transformer technologies[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(5):1274-1289.
- [3] 余紫薇,范越,赵建勇,等. 考虑供电半径延长的配电网用电力电子调压器控制策略[J]. 电力科学与技术学报,2022,37(3):61-69.
YU Ziwei,FAN Yue,ZHAO Jianyong, et al. A control strategy of power electronic voltage regulator for distribution network considering extension of power supply radius[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2022,37(3):61-69.
- [4] 徐峰亮,王发义,赵建涛,等. 采用有载调容调压变和 MPC 技术的配电网台区低电压治理[J]. 电力建设,2023,44(10):117-126.
XU Fengliang,WANG Fayi,ZHAO Jiantao, et al. Low-voltage management in distribution platform area by on-load capacity and voltage regulating transformer and model predictive control technology[J]. Electric Power Construction,2023,44(10):117-126.

- [5] 赵书涛, 李小双, 李大双, 等. 基于相空间重构与 GSA-LVQ 的有载调压变压器分接开关机械故障诊断[J]. 电测与仪表, 2023, 60(10):136-141.
ZHAO Shutao, LI Xiaoshuang, LI Dashuang, et al. Mechanical fault diagnosis of on-load voltage regulating tap-changer based on CEEMD-phase space reconstruction and GSA-LVQ[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(10):136-141.
- [6] 夏革非, 丁智涵, 于长任, 等. 基于数据驱动的有源配电网实时调度降损策略[J]. 电测与仪表, 2022, 59(12):103-109.
XIA Gefei, DING Zhihan, YU Changren, et al. Real-time scheduling strategy for loss reduction of active distribution network based on data-driven method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(12):103-109.
- [7] 杨晓辉, 邓福伟, 张钟炼, 等. 基于自适应 ε 约束法考虑 OLTC 模糊控制的低碳配电网双层规划[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(13):1-11.
YANG Xiaohui, DENG Fuwei, ZHANG Zhonglian, et al. Bi-level planning for low-carbon distribution networks based on an adaptive ε -constraint method considering OLTC fuzzy control[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(13):1-11.
- [8] RICHARDSON M T, HENRY G A, MCKENNON N R. Micro-controller based solid state on-load tap changer for pole mounted transformers[C]//SoutheastCon. Atlanta, GA, USA. IEEE, 2021: 1-4.
- [9] CAO H, WU X W, ZHOU J H, et al. Research progress on mechanical fault diagnosis of on-load tap changer based on vibration analysis[C]//2021 IEEE International Conference on Power Electronics, Computer Applications (ICPECA). Shenyang, China. IEEE, 2021:948-951.
- [10] 高桂英, 董锐, 夏小晴, 等. 电力电子技术在有载分接开关中应用研究[J]. 电气传动, 2021, 51(6):73-80.
GAO Guiying, DONG Rui, XIA Xiaoqing, et al. Study on power electronics application in on-load tap changer[J]. Electric Drive, 2021, 51(6):73-80.
- [11] 徐艳, 陈冰冰, 马宏忠, 等. 基于 EMD-PSD 的 OLTC 振动信号特征提取方法[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(5):3-10.
XU Yan, CHEN Bingbing, MA Hongzhong, et al. Vibration signal feature extraction method of the on-load tap changer based on EMD-PSD[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(5):3-10.
- [12] 凌松, 杨春波, 刘志祥, 等. 基于电子开关的配电变压器有载调压方法研究[J]. 电子设计工程, 2019, 27(21):63-67.
LING Song, YANG Chunbo, LIU Zhixiang, et al. On-load voltage regulation method of distribution transformer based on electronic switch[J]. Electronic Design Engineering, 2019, 27(21):63-67.
- [13] 宋开胜, 王华芳, 马宏忠, 等. 10 kV 配电变压器自动调压的研究以及试验分析[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(4):30-35, 62.
SONG Kaisheng, WANG Huafang, MA Hongzhong, et al. Research and experimental analysis on automatic voltage regulation of 10 kV distribution transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4):30-35, 62.
- [14] 张勇, 季兰兰, 袁艺嘉, 等. 柔性直流变压器有载分接开关控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(4):35-45.
ZHANG Yong, JI Lanlan, YUAN Yijia, et al. On-load tap changer control strategy for VSC-HVDC transformer[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4):35-45.
- [15] 陈朋, 李磊, 颜世凯. 基于电力电子器件的配电变压器有载调压技术研究[J]. 变压器, 2021, 58(2):30-35.
CHEN Peng, LI Lei, YAN Shikai. Research on on-load tap-changing technology of distribution transformer based on power electronic devices[J]. Transformer, 2021, 58(2):30-35.
- [16] 杨树德, 曾梓康, 张新闻, 等. 基于电力电子开关的有载调压变压器研究[J]. 电气传动, 2022, 52(19):33-38.
YANG Shude, ZENG Zikang, ZHANG Xinwen, et al. Research on on-load voltage regulating transformer based on power electronic switch[J]. Electric Drive, 2022, 52(19):33-38.
- [17] 宋祺鹏, 秦开明, 戚振彪, 等. 基于电子开关的高精度宽幅有载调压配电变压器研究[J]. 电网技术, 2018, 42(9):3055-3060.
SONG Qipeng, QIN Kaiming, QI Zhenbiao, et al. Research on high accuracy and wide range OLTC transformer based on power electronic technology[J]. Power System Technology, 2018, 42(9):3055-3060.
- [18] 刘志良, 邱庆华. 采用电抗式开关的低压有载调压变压器设计[J]. 变压器, 2022, 59(9):6-9.
LIU Zhiliang, QIU Qinghua. Design of power transformer with reactance OLTC in LV side[J]. Transformer, 2022, 59(9):6-9.
- [19] NEAGU B C, GRIGORAS G. Optimal voltage control in power distribution networks using an adaptive on-load tap changer transformers techniques[C]//2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIEMEN). Craiova, Romania. IEEE, 2019:1-6.
- [20] GUAN S P, WANG Q, WANG T Z, et al. Research on a new type of on-load automatic voltage regulation technology[C]//2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). Chongqing, China. IEEE, 2017:2541-2544.
- [21] 王春霖, 刘畅, 杨华, 等. 基于复合开关级联 H 桥结构的有载调压配电变压器[J]. 高电压技术, 2022, 48(5):1987-1996.
WANG Chunlin, LIU Chang, YANG Hua, et al. On-load tap changer distribution transformer based on hybrid-switch cascaded H-bridge structure[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5):1987-1996.
- [22] CUPELLI L, RUIZ J T, MONTI A. Optimal voltage control in power systems: inclusion of discrete decision variables[C]//2018 19th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON). Marrakech. IEEE, 2018:138-143.
- [23] BANGASH K N, FARRAG M E A, OSMAN A H. Smart control

- of on load tap changer deployed in low voltage distribution network [C]//2015 4th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS). Sharjah, United Arab Emirates. IEEE,2015;1-6.
- [24] CAO W Y, HE J H, ZHOU Y B. Voltage control in distribution networks with soft open point and on-load tap changer [C]//2021 IEEE 4th International Conference on Electronics Technology (ICET). Chengdu, China. IEEE,2021;446-451.
- [25] YU B, ZHAO L, LIN H F, et al. Analysis of time domain characteristic of transformer on-load tap-changer [C]//2021 6th International Conference on Integrated Circuits and Microsystems (ICICM). Nanjing, China. IEEE,2021;390-393.
- [26] 高硕. 高频隔离型混合配电变压器拓扑及控制策略研究 [D]. 吉林:东北电力大学,2023.
GAO Shuo. Research on topology and control strategy of high frequency isolated hybrid distribution transformer [D]. Jilin: Northeast Electric Power University,2023.
- [27] 李鑫海. 级联型电力电子变压器的优化控制策略研究 [D]. 贵阳:贵州大学,2023.
LI Xinhai. Research on optimal control strategy for cascaded power electronic transformer [D]. Guiyang: Guizhou University,2023.
- [28] CHEN W M, WENG X C, CHEN S C, et al. Design of cascade power electronic transformer based flexible interconnection system for distribution network [C]//2023 8th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE). Shanghai, China. IEEE,2023;596-600.
- [29] 祝涛. 混合频率变换电力电子变压器效率优化策略研究 [D]. 北京:华北电力大学,2023.
ZHU Tao. Research on efficiency optimization strategy of mixed frequency conversion power electronic transformer [D]. Beijing: North China Electric Power University,2023.
- [30] 江文中. 带混合储能装置的电力电子变压器的研究 [D]. 淮南:安徽理工大学,2023.
JIANG Wenzhong. Research on power electronic transformer with hybrid energy storage device [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology,2023.
- [31] HAO Z, LIU G W, ZHAO J H, et al. Simulation and analysis of high frequency harmonic components of voltage and current of converter transformer in flexible DC system [C]//2023 5th International Conference on Electronic Engineering and Informatics (EEI). Wuhan, China. IEEE,2023;181-187.

作者简介:



刘水

刘水(1981),男,硕士,高级工程师,从事输变电技术及电能质量分析工作(E-mail: 20281876@qq.com);

张胜强(1987),男,学士,高级工程师,从事电力配电运行检修及自动化工作;

唐伟华(1985),男,硕士,工程师,从事变电运行工作。

Voltage and reactive power coordinated control strategy for flexible on-load tap changer

LIU Shui¹, ZHANG Shengqiang¹, TANG Weihua¹, WANG Song², YIN Jingyuan²

(1. Huizhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Huizhou 516000, China;

2. The Institute of Electrical Engineering Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: As the increasing proportion of renewable energy and power electronic devices in the power grid, voltage fluctuations are becoming frequent. In response to the current voltage regulation and reactive power compensation requirements of the distribution network, a new type of flexible on-load tap changer is designed that integrates traditional transformers and power electronic converters. This novel transformer can simultaneously provide voltage regulation and reactive power compensation capabilities. Firstly, the principles of voltage regulation and reactive power compensation on the series and parallel sides of the power electronic converter are analyzed. Then, considering the operation of the on-load tap changer, two series parallel voltage and reactive power coordination control strategies based on minimum voltage amplitude and minimum active power loss are proposed to achieve continuous voltage regulation while providing maximum range of reactive power. Finally, the structural rationality of the on-load tap changer and the correctness of the voltage and reactive power coordination control strategy are verified through simulation and experiments. The stepless voltage regulation and reactive power compensation under multiple objectives can be realized by the voltage and reactive power coordinated control strategy for flexible on-load tap changer.

Keywords: flexible voltage regulator; on-load voltage regulation; power electronic converter; stepless voltage regulation; reactive power compensation; power electronic transformer

(编辑 陆海霞)