

9-14-2020

Research on control method of flexible grounding device for suppressing threephase unbalance in distribution network

Xiangjun ZENG

Hunan Province Key Laboratory of Smart Grids Operation and Control , Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114 , China

Li LI

Hunan Province Key Laboratory of Smart Grids Operation and Control , Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114 , China

Kun YU

Hunan Province Key Laboratory of Smart Grids Operation and Control , Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114 , China

Duohong CHEN

Hunan Province Key Laboratory of Smart Grids Operation and Control , Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114 , China

Jianhua LI

Luoyang Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Company, Luoyang 471000 , China

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

See next page for additional authors

Recommended Citation

ZENG, Xiangjun; LI, Li; YU, Kun; CHEN, Duohong; LI, Jianhua; and CHE, Xiaotao (2020) "Research on control method of flexible grounding device for suppressing threephase unbalance in distribution network," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 35: Iss. 3, Article 3.

DOI: 10.19781/j.issn.16739140.2020.03.003

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol35/iss3/3>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

Research on control method of flexible grounding device for suppressing three-phase unbalance in distribution network

Authors

Xiangjun ZENG, Li LI, Kun YU, Duohong CHEN, Jianhua LI, and Xiaotao CHE

抑制配电网三相不平衡的柔性接地装置控制方法

曾祥君¹, 李理¹, 喻 锐¹, 陈朵红¹, 李建华², 车晓涛²

(1. 长沙理工大学智能电网运行与控制湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114; 2. 国网河南省电力公司洛阳供电公司, 河南 洛阳 471000)

摘要:为提高现有柔性接地装置抑制配电网三相不平衡的稳定性与信号跟踪能力,提出一种基于改进双闭环控制策略的柔性接地装置控制方法。通过对控制系统进行建模和分析,并提出注入电流的控制策略。该策略在双闭环控制的基础上,采用电流内环PI控制和电压外环滞后网络控制。将中性点电压参考值设置为零,并以其作为控制目标,实时比较参考值和中性点电压反馈量之间差值。该差值经过串联滞后校正环节后可作为电流内环产生参考电流,电流理论参考值与实际测量值构成的偏差作为PI校正环节的输入量,实现对输出电流的目标控制,有效提高电流的稳定裕度,缩短了输出与输入信号的跟踪时间。系统仿真分析结果表明该方法在三相不平衡过电压抑制中性点电压良好,能够将配电网中性点不平衡过电压精确抑制到零。

关键词:三相不平衡;柔性接地装置;注入电流控制;PI校正;滞后环节

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.03.003 中图分类号:TM77 文章编号:1673-9140(2020)03-0019-10

Research on control method of flexible grounding device for suppressing three-phase unbalance in distribution network

ZENG Xiangjun¹, LI Li¹, YU Kun¹, CHEN Duohong¹, LI Jianhua², CHE Xiaotao²

(1. Hunan Province Key Laboratory of Smart Grids Operation and Control, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. Luoyang Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Company, Luoyang 471000, China)

Abstract: In order to improve the stability and signal tracking ability of existing flexible grounding devices to suppress the three-phase unbalance in distribution networks, a flexible grounding control method is proposed based on the improved double closed-loop control strategy. Firstly, the control system is modeled and analyzed, and an injection current control strategy is proposed. This strategy is based on the double closed-loop control and it adopts the current inner-loop PI control and voltage outer-loop hysteresis network control. By setting the reference value of neutral point voltage to zero and taking it as the control target, the difference between the reference value and the feedback value of neutral point voltage is compared in real time. And then the difference goes through the series lag correction. Thus, it can be treated as a reference current in the current inner loop. The deviation between the theoretical reference current and the actual measurement current is taken as the input of PI correction link. For the outer loop output, the target control for the output current is realized, the stability margin of current is effectively improved and the tracking time of output and input signals is shorten. The good performance of proposed method in three-phase unbalanced

收稿日期:2019-03-25;修回日期:2019-04-29

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51737002);国网河南省电力公司重点科技项目(5217A0180001)

通信作者:曾祥君(1972-),男,博士,教授,博士生导师,长江学者,主要从事电力系统保护与控制研究;E-mail: eexjzeng@qq.com

overvoltage suppression is verified by a system simulation analysis. Neutral point voltage in distribution network is accurately suppressed to zero.

Key words: three-phase unbalance; flexible grounding device; injection current control; PI correction; lagging link

配电网产生三相不平衡过电压原因有多种,主要有线路架设方式、电压互感器不对称配置以及中性点接地方式的改变等,而三相对地参数不对称是造成不平衡电压的主要原因^[1-4]。正常运行情况下,配电网允许有一定程度的不平衡度^[5],但如果对不平衡度不加以控制,可能导致三相不平衡过电压,给系统的安全稳定运行带来危害。

目前,对配电网三相不平衡过电压常用处理手段主要是通过改变配电系统的接地方式,在一次或二次侧串联或并联阻尼电阻,从而改变中性点对地阻抗以实现对不平衡过电压抑制;对于由对地参数不平衡引起的过电压,采取手动投切线路电容器或电抗器来实现对不平衡参数的补偿^[6],而传统手动投切方式无法实时跟踪参数变化,同时其补偿精度低;在电力电子技术不断成熟的背景下,也逐渐出现了采取基于电力电子技术控制的静止无功补偿器^[7-8],同时在补偿过程中减小其产生的谐波比例一直是此领域需攻关的难点。

为了解决接地方式单一给配电网不平衡抑制带来的难题,该课题组前期研究提出了中性点柔性接地方式^[9],利用柔性控制装置补偿不平衡过电压^[10-11]。可以实时根据配电网运行状态、参数的变化进行调控^[12],通过获取中性点接地阻抗的大小,调节柔性控制装置输出电压、电流,从而改变配电网线路对地电流的分布,实现对零序电压的控制,最终达到对三相不平衡过电压实时钳制的目标。该方法克服了各种接地方式的不足,在三相不平衡过电压抑制技术领域具有较大价值。

现有的基于经典控制理论的逆变器控制策略,其控制目标为提高并网发电功率^[13-14]、增强分布式电力系统中多逆变器的稳定性^[15]以及减小电网电流谐波含量等,其相关控制策略与配电网不平衡过电压抑制要求指标有待进一步验证,因此不存在控制方法直接沿用至柔性接地装置上的可能性。而配电网中柔性接地装置主要功能为通过抑制配电网中性点不平衡过电压维持三相电压的平衡,文献^[7]所提控制方法主要针对接地故障处理,由于控制目标

不同,此双闭环控制策略在控制不平衡过电压上存在过渡时间长、不满足不平衡过电压抑制要求。文献^[12]所提三相不平衡控制算法需实时调整输出电压幅值相角,对电压输入信号跟踪要求较强,而在控制方法论述上未就此进行针对性研究。因此,要求配电网不平衡过电压控制逆变器能准确跟踪输入参考值,并对给定输入指令做出快速响应。

该文以中性点不平衡电压抑制为目标,对现有双闭环控制方法进行改进,设计将 PI 反馈环节和滞后校正相结合的复合校正方案,电流内环采用 PI 控制,电压外环采用滞后网络进行调节,实现参考值的精准快速跟踪响应,使系统截止频率、波形畸变率降低,抑制高频噪声对装置的影响,提高系统的动稳态性能,实现过电压的抑制。并且,采用配电网系统参数对控制器参数进行设计与调整,在仿真软件中搭建配电网柔性控制模型,验证所提控制策略对系统的有效性。

1 柔性控制装置不平衡过电压抑制原理

1.1 不平衡过电压抑制方法

10 kV 配电网三相不平衡过电压抑制柔性接地系统拓扑结构如图 1 所示, E_A 、 E_B 、 E_C 为配电网 A、B、C 三相电源电动势, C_A 、 C_B 、 C_C 为配电网三相对地电容, r_A 、 r_B 、 r_C 为配电网三相对地泄漏电阻, L_P 为消弧线圈电感, I_i 为注入电流, T 为注入变压器, L_o 、 C_o 分别为滤波电感、电容,逆变器直流侧电容用 C_{dc} 表示。

连接在中性点与地之间的柔性控制装置主要由三相不可控整流器以及接有 LC 输出滤波回路的单相逆变器组成。整流电路将从接地变压器低压侧引进的三相交流电流整流成单相直流电流,然后由逆变电路转换成单相交流电流,经滤波回路后输出所需电流,从而改变配电网中性点电压与对地支路电流的分布,实现三相不平衡过电压抑制。

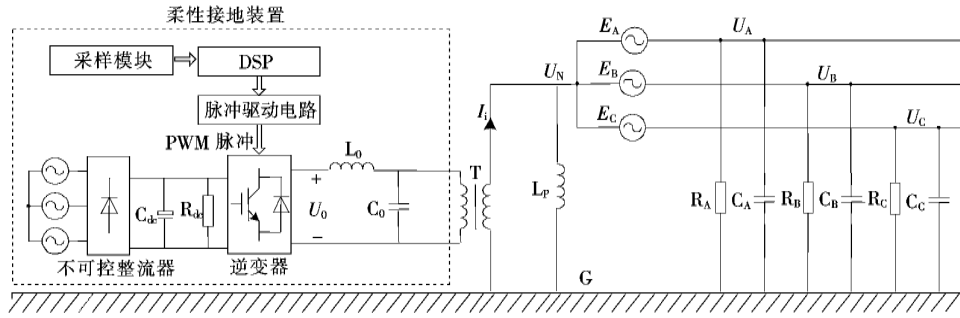


图 1 配电网经柔性接地装置接地系统结构

Figure 1 Structure diagram of distribution network grounded through flexible grounding device

根据图 1,当三相不平衡过电压发生初始时刻,由基尔霍夫定律知,有:

$$U_{N0} \left[\frac{1}{j\omega L_P} + j\omega(C_A + C_B + C_C) + \frac{1}{r_A} + \frac{1}{r_B} + \frac{1}{r_C} \right] + E_A Y_A + E_B Y_B + E_C Y_C = 0 \quad (1)$$

式中 U_{N0} 为发生配电网三相不平衡过电压时的中性点位移电压; C_A 、 C_B 、 C_C 为对应三相对地电容值, A、B、C 相对地导纳分别为 $Y_A = \frac{1}{r_A} + j\omega C_A$ 、 $Y_B = \frac{1}{r_B} + j\omega C_B$ 、 $Y_C = \frac{1}{r_C} + j\omega C_C$ 。

当 PWM 有源逆变器向中性点注入电流 \dot{I}_i 时,对中性点列节点电流方程:

$$U_{N0} \left[\frac{1}{j\omega L_P} + j\omega(C_A + C_B + C_C) + \frac{1}{r_A} + \frac{1}{r_B} + \frac{1}{r_C} \right] + E_A Y_A + E_B Y_B + E_C Y_C = \dot{I}_i \quad (2)$$

由式(2)可知,当注入电流 $\dot{I}_i = \dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C Y_C$ 时,可将中性点位移电压抑制为 0,彻底消除中性点的位移电压。将条件 \dot{I}_i 代入式(1),则注入电流可以表示为

$$\dot{I}_i = -U_{N0} \left[\frac{1}{j\omega L_P} + j\omega(C_A + C_B + C_C) + \frac{1}{r_A} + \frac{1}{r_B} + \frac{1}{r_C} \right] \quad (3)$$

当注入电流 \dot{I}_i 满足式(3)时,可有效地抑制中性点 $U_N = 0$ 。且由式(3)可知,注入电流的幅值相位由三相不平衡发生时中性点位移电压 U_{N0} 决定。因此,可通过测量三相不平衡过电压发生时刻的中性点位移电压,控制柔性接地装置往中性点注入一

定幅值相位的电流,实现电压目标抑制。

相较于以往的注入电流的方法^[10-11],该文所提方法中所需测量的三相不平衡过电压时刻的中性点位移电压值可直接获得,从而极大地简化了不平衡抑制的复杂化程度,提升了配电网中性点位移电压的抑制速度。

1.2 控制环节建模

对图 1 所示控制系统进行建模,得到图 2 所示系统等效模型, U_d 表示直流侧电压,虚线框中表示单相逆变桥电路拓扑结构, R_{eq} 、 C_{eq} 为等效到装置侧的等效电阻和电容, U_N 为中性点电压。

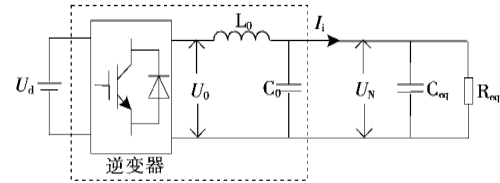


图 2 经柔性控制装置接地的系统等效模型

Figure 2 Equivalent circuit diagram of distribution network grounded through flexible control device

将中性点参考电压值设置为零,根据图 2 等效模型及图 1 控制结构,建立系统复合控制策略模型,如图 3 所示。

图 3 中,虚线内代表经柔性控制装置接地的配电系统,用 K_{INV} 表示逆变器增益, G_{PI} 、 G_c 分别表示电流内环 PI 校正器、串联滞后校正器的传递函数。从上述控制框图可知,系统以中性点电压参考值为零为控制目标,实时比较参考值和中性点电压反馈量之间差值,再将差值经串联滞后校正环节后,为电流内环产生参考电流;PI 用作系统内环校正,依据电流理论参考值与实际测量值之间偏差,再将偏差送入 PI 校正环节,实现对目标的控制。

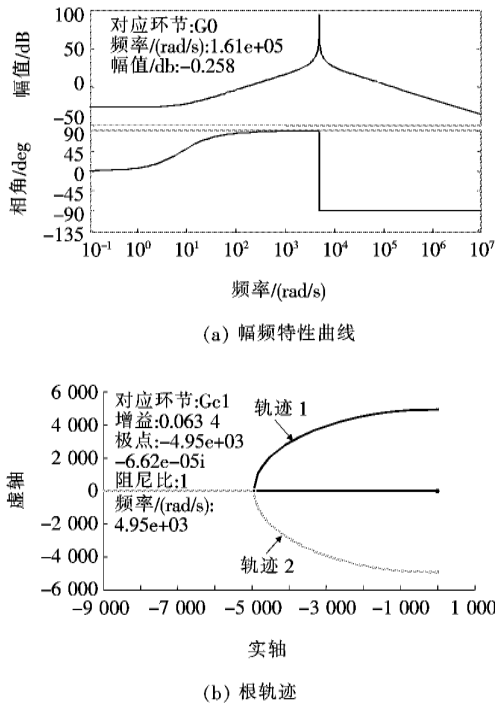


图 5 未加 PI 控制器前配电系统传递函数特性

Figure 5 Distribution network transfer function characteristics without PI controller

2) 确定 PI 内环控制器的积分系数。

在确定 PI 内环控制器的比例系数 K_P 的基础上,对 PI 控制器的积分系数 K_I 进行设计,当比例系数 $K_P = 0.0634$ 时,积分系数 K_I 分别取 0.01、0.1、1、10、100、1 000、10 000 的电流内环闭环传递函数幅频特性曲线如图 6 所示。

选择满足式(8)的 K_P 、 K_I 进行 Bode 图分析,改变积分系数的大小,系统为恒稳状态但传递函

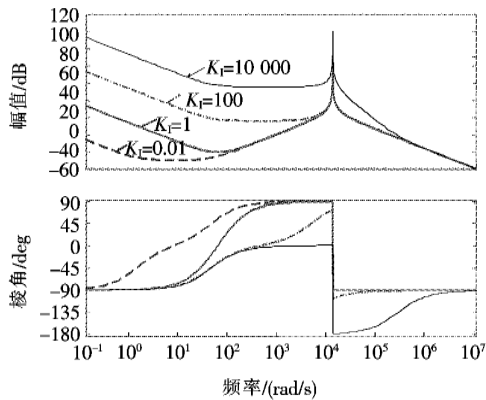


图 6 不同积分系数的幅相频特性曲线

Figure 6 Amplitude-frequency and phase-frequency characteristic curve with different integral coefficients

数的幅值裕度和相角裕度存在差异。从 Bode 图可以看出,当 PI 控制器积分系数取值范围在 1 000~10 000 之间时,可产生最佳相角裕度。则可根据相应 Bode 图及幅相频特性关系,求取 PI 控制器积分系数 K_I 的确切值。

根据图 6 可知,配电网等效传递函数的穿越频率为 $\omega = 1.61 \times 10^5$ rad/s;内环 PI 控制器的表达式为 $G_{PI} = (K_P s + K_I)/s$;幅频和相频特性的关系式分别为 $L(\omega)$ 、 $\alpha(\omega)$:

$$L(\omega) = 20 \lg \frac{\sqrt{(K_P \omega)^2 + (K_I)^2}}{\omega} \quad (8)$$

$$\alpha(\omega) = \arctan \frac{K_P \omega}{K_I} - 90^\circ \quad (9)$$

根据式(8)、(9)对内环 PI 控制器的 K_I 进行参数确定,一般工程应用上将相角裕度设定为 45° ^[17-18],则可兼顾系统的稳态误差和响应速度,从未加任何控制器校正的系统幅相频特性曲线上可以看出,系统相角裕度为 90° ,此时裕度不满足设计要求,因此将 PI 控制器补偿的相角设置为 -45° ,即 $\alpha(\omega) = -45^\circ$,所以由式(9)可得: $K_I = 10\,207.4$ 。因此,内环 PI 控制器 K_P 和 K_I 的值分别为 0.063 4 和 10 207.4,为了进一步对此值的选取合理性进行验证,再根据 K_P 和 K_I 的取值进行系统稳定性验证,因此内环 PI 控制器传递函数可确定为 $G_{PI} = (0.0634s + 10\,207.4)/s$,经 PI 控制器调节前后整个系统的开环传递函数幅相频特性曲线及 PI 校正前后系统幅相频特性曲线对比如图 7 所示。

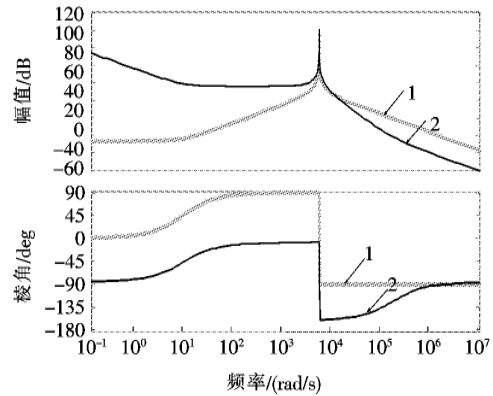


图 7 PI 校正前后配电系统幅相频特性曲线

Figure 7 Distribution system amplitude-frequency characteristic curve before and after PI correction

图 7 中线 1(浅色线)、线 2(黑色线)分别表示经内环 PI 校正前后系统的幅相频曲线,由图可知,经过 PI 内环校正之后,系统的稳定性得以改善,提高了系统的抗扰能力及稳定性能,相角裕度达到预设的 45° 左右。

2.2 串联滞后校正控制器及其参数设计

通过 PI 内环控制后大大提高了系统的抗干扰能力及稳定性,虽仅经 PI 内环校正的系统处于稳定状态可以实现相应功能,但是单闭环控制存在系统截止频率过大、抗信号干扰性能差的缺点。因此,在保证一定响应速度的条件下,需提高系统的抗干扰能力;同时,PI 控制的电流环是以电流为控制目标,虽电流的可控性比电压高,但计算参考电流值公式复杂,受配电网对地参数的影响,对控制效果产生一定的影响。因此,该文提出在控制框图的前向通道上串联一个滞后校正环节,进一步对系统进行校正。

通常串联滞后校正通过在系统中加入滞后校正网络实现对整个系统的进一步改善,并利用其高频衰减特性,降低系统开环截止频率,在保证系统响应速度的同时增强系统的抗干扰性能,提高系统的相角裕度。设串联滞后校正网络传递函数的表达式为

$$G_c = \frac{bTs + 1}{Ts + 1} \quad (10)$$

式中 T 、 b 为滞后校正网络系数。

$$G_1 = \frac{R_{eq}}{1 + R_{eq}C_{eq}s} \quad (11)$$

根据图 4 的控制框图,得到电压外环传递函数:

$$G_{\text{外环}} = G_{\text{内环}} G_1 \quad (12)$$

将式(10)、(11)代入式(12),由配电网参数表 1 中数据,求得外环开环传递函数,可得外环幅频曲线,如图 8 所示。

由图 8 串联滞后校正后曲线表明整个系统相角

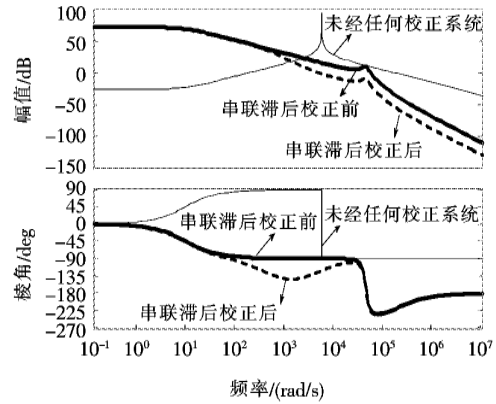


图 8 控制器作用前后整个系统幅相频特性曲线

Figure 8 Amplitude-frequency and phase-frequency characteristic curve of the system before and after adding controller

裕度呈现滞后的性质,因此,进行下一步串联滞后校正装置的网络参数设计。

1) 确定滞后网络参数 b 。

在未进行串联滞后校正的系统幅频特性曲线中,找到相角裕度为 $\varphi(\omega'_c) = -(180^\circ - \gamma - \epsilon)$ 时所对应的频率,将此频率当作校正后系统新的截止频率 ω'_c 。其中, γ 为预设的相角裕度, ϵ 为补偿滞后校正装置在新的截止频率 ω'_c 上产生的相位滞后。一般情况下取 γ 为 45° , ϵ 取 10° ^[19-20], 则 $\varphi(\omega'_c) = -(180^\circ - \gamma - \epsilon) = -125^\circ$ 。

从图 9 中找到相角为 -125° 所对应的频率值,可得出 $\omega'_c = 35\,900$ rad/s。选择 Bode 图上截取 $20\lg |G_o(j\omega'_c)|$ 的幅值,可得:

$$20\lg \frac{1}{b} = L_o(\omega'_c) \quad (13)$$

其中, $\frac{1}{b} = 9.28$, 则 $b = 0.107$ 。

2) 确定滞后网络参数 T 。

确定参数 b 后,根据公式 $\frac{1}{bT} = \left(\frac{1}{5} \sim \frac{1}{10}\right)\omega'_c$, 可计算出 $T = 0.002\,61$ 。即得到串联滞后校正网络传递函数表达式:

$$G_c = \frac{bTs + 1}{Ts + 1} = \frac{2.79 \times 10^{-4}s + 1}{0.002\,61s + 1} \quad (14)$$

则校正后的系统传递函数:

$$G = G_c G_{\text{内环}} G_1 \quad (15)$$

此时,校正后的系统函数幅相频特性曲线如图

表 1 配电网系统仿真参数

Table 1 Distribution power system simulation parameters

对地电容/ μF			三相对地	输出滤波	
A 相	B 相	C 相	电阻/ Ω	电感/H	电容/ μF
9	9	14	12 000	0.000 5	50

8 中虚线所示,图中细黑色线代表未经任何控制器校正的系统幅相频特性曲线,从图中可以看出,系统的稳定性较差,且有谐振峰。粗黑色线和虚线分别代表复合校正前后系统的幅相频特性曲线,从复合校正后的 Bode 图可以看出,整个系统开环传递函数幅频特性曲线得以改善,系统的谐振峰得以削减,在满足快速性的条件下,截止频率降低,抗干扰性能提升,且相角裕度处于理想裕值范围,系统达到了设计的目的。

3 仿真分析

为验证所提复合控制策略的动态性能,在 MATLAB 中搭建串联滞后校正控制器模型,并对系统的校正影响进行仿真实例分析。同时在基于电力电子暂态环境下,在仿真软件 PSIM 中搭建 10 kV 配电网仿真模型,模拟配电网产生三相不平衡过电压,将所提控制方法应用于控制系统中,对其准确性与正确性进行验证。

3.1 串联滞后校正控制器的响应性能仿真分析

在 PI 控制器的基础上,加入串联滞后校正环节,构成 PI+串联滞后的复合抗扰控制系统,在系统的传递函数仿真模型中加入正弦和阶跃激励信号,得到系统对激励所做出的响应波形,如图 9、10 所示。

从图 9 可看出,采用串联滞后校正后,在正弦波信号的作用下,系统对输入信号的跟踪能力,无论是跟踪响应的速度还是对输入波形跟踪的精准性能都明显优于未进行滞后校正的系统;图 10 可看出,输入单位阶跃信号,系统在经串联滞后校正后,对输入

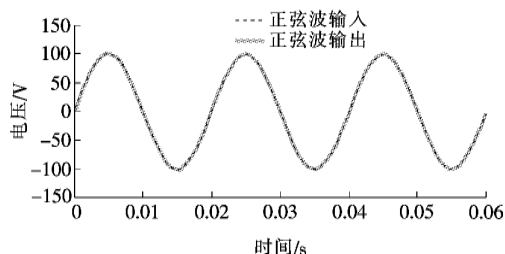


图 9 复合校正后系统的参考波形与正弦响应波形对比

Figure 9 Comparison of reference waveform and sine response waveform after compound correction

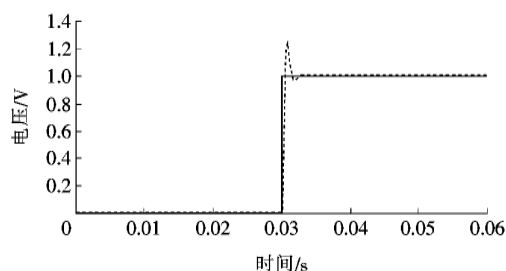


图 10 复合校正后系统的参考波形与阶跃响应波形对比

Figure 10 Comparison of reference waveform and step response waveform after compound correction

信号的快速跟踪响应,可以在 10 ms 的时间内完成,且稳态误差接近零,并且快速得以稳定。仿真分析证明该文所提出的复合控制策略可提高系统动、稳态性能的特征优良,与理论分析相符合。

3.2 系统响应性能仿真分析

在仿真软件 PSIM 中搭建 10 kV 配电网仿真模型,系统参数如表 2 所示,针对三相对地电容不平衡过电压场景进行仿真分析。设置系统处于中性点不平衡过电压状态, $t=0.2$ s 注入电流,仿真时长为 0.3 s。

表 2 三相不平衡过电压抑制结果

Table 2 Three-phase unbalanced overvoltage suppression results

名称	A 相电 压/kV	B 相电 压/kV	C 相电 压/kV	中性点 电压/kV	注入电 流/A
注入电流前	8.99	9.15	7.83	1.600	0
注入电流后	8.44	8.47	8.45	0.014	13.7

在系统模型中仿真未加串联滞后校正双闭环控制方法,得到中性点电压抑制效果如图 11 所示。同时仿真分析该文所提增加串联滞后环节控制策略,得到中性点电压抑制效果如图 12 所示。

未加滞后校正双闭环控制方法,其内环采用 PI 控制器外环采用比例积分,从其仿真效果与该文所提改进的 PI 控制器与串联滞后方法进行对比,由图 11 可知,前期研究所提控制方法在过电压抑制过渡时间较长,超过一个周波的时长;由图 12 可知,该文所提方法其过渡时间仅为四分之一周波,远小于未加串联滞后环节的过渡时长。因此可得,串联滞

后环节对输入波形可快速跟踪,使中性点过电压在 10 ms 内平稳抑制为零。

图 12~14 所示为系统出现不平衡过电压时,采

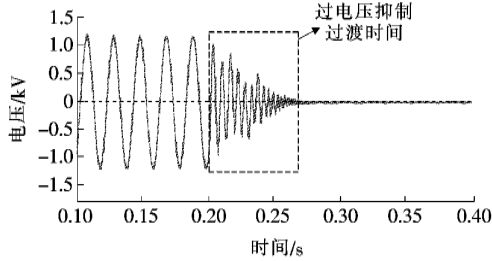


图 11 未加滞后校正的中性点电压抑制波形

Figure 11 Neutral point voltage suppression waveform diagram without delay correction

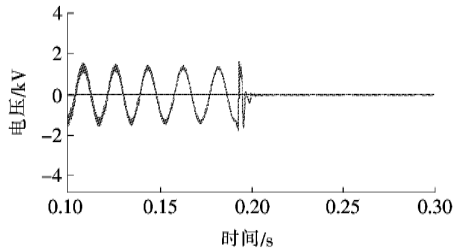


图 12 加入滞后校正的中性点电压抑制波形

Figure 12 Neutral point voltage suppression waveform diagram with delay correction

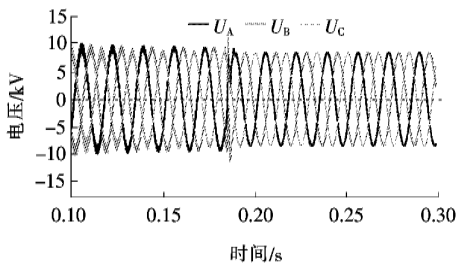


图 13 配电网三相电压动态波形

Figure 13 Three-phase voltage dynamic waveform diagram of distribution network

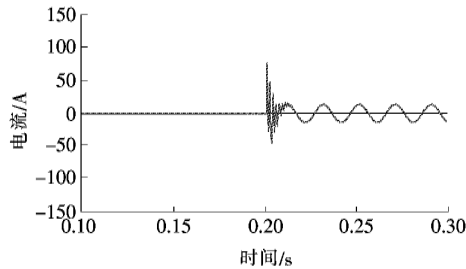


图 14 注入电流波形

Figure 14 Injection current waveform diagram

用所提出的控制理论与方法进行不平衡过电压抑制的仿真结果。图 12 为中性点过电压抑制波形,图 13 为配电网三相电压动态波形,图 14 为注入电流波形。

由图 12 分析可知,在发生不平衡过电压时,中性点电压为 1.6 kV,在注入电流前后,中性点电压从 1.6 kV 降到 16 V,降幅为 99.1%。如图 13 所示,配电网由初始三相不平衡、带有毛刺状态恢复到完全平衡状态,说明通过注入所需电流可以实现三相不平衡的钳制。图 14 所示,波形在半个周波内达到稳定输出状态。表 2 所示为抑制前后各电压数值。

由表 2 可知,在注入电流前,A、B、C 三相电压出现不平衡状态,B 相电压最高,C 相电压最低,中性点偏移电压 1.6 kV。在注入电流进行三相不平衡过电压抑制后,三相电压电压基本大小相等,不平衡度在配网稳定运行允许的范围内,实现了对配电网三相不平衡过电压的有效抑制。

三相负荷变化时三相不平衡过电压抑制效果如图 15 所示。设置在保持抑制中性点过电压的情况下发生负荷变化,此时可看出单相负载的波动引起了中性点电压的波动,而控制算法反应灵敏,在半个周波内可抑制负荷变化带来的电压波动。因此反映了当三相中的负荷发生变化时,该文提出控制方法能准确地抑制中性点不平衡电压,自适应性能优越,稳定性良好。

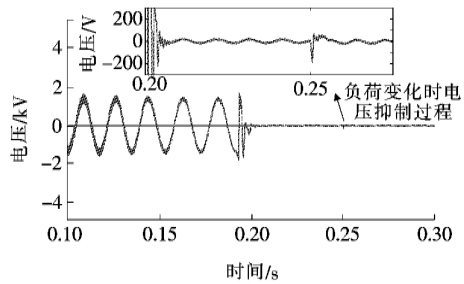


图 15 三相负荷变化时三相不平衡过电压抑制

Figure 15 Three-phase unbalanced overvoltage suppression diagram with three-phase load changed

由仿真结果表明,所提控制方法能稳定跟踪输入波形,在系统发生三相不平衡过电压时输出电流能稳定有效地将中性点电压抑制到零,达到系统控制器各环节设计的目的。

4 结语

该文所提在配电网中性点接入柔性接地装置,通过控制配电网中性点电压的方法,以柔性接地装置的电压控制为目标,即控制配电网中性点电压为零。通过对配电网经柔性接地系统的建模、计算分析,针对不平衡过电压抑制目标,设计系统复合校正控制器。复合校正控制器由 PI 环节和串联滞后环节组成,通过分析计算确定积分系数的取值范围,在系统中加入滞后环节后,大大减弱了控制系统对参数的敏感程度,当系统参数出现大范围变化时,能维持良好的控制性能,从整体上提高控制系统的稳定性、动态性能和输出波形的跟踪能力。

通过 MATLAB 与 PSIM 仿真分析表明,该复合校正控制方案可以很好地对输入信号进行快速、精准、稳定跟踪响应,增强了整个系统稳定性能,加快了整体响应速度,保证中性点电压的快速精确控制。在未来研究中将考虑把控制方案与实际装置结合,进行工程推广应用。

参考文献:

- [1] 刘锋. 电网不平衡下三相锁相环研究[D]. 成都:电子科技大学,2013.
- [2] Kalyuzhny A. Analysis of temporary over-voltages during open-phase faults in distribution networks with resonant grounding[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2015,30(1):420-427.
- [3] 胡京莹. 基于零序电压柔性控制的配电网过电压抑制技术研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2013.
- [4] Liu M,Zhao J X. The compensation effect of the distributed Arc suppression coil in 10kV network system [C]//IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Florence, Italy: IEEE,2016.
- [5] 李家靖,严欣,袁佳欣,等. 三相不平衡条件下低压配电网合环操作研究[J]. 电力科学与技术学报,2018,33(2):117-122.
LI Jiajing, YAN Xin, YUAN Jiaxin, et al. Study on closed loop operation of low voltage distribution network under three-phase unbalanced condition[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2018,33(2):117-122.
- [6] 余文辉,李健,陈祖勋. 配电网接地故障电压消弧新方法[J]. 电力科学与技术学报,2012,27(1):64-69.
YU Wenhui, LI Jian, CHEN Zuxun. A novel voltage arc-suppression method for grounding faults in distribution networks [J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2012,27(1): 64-69.
- [7] 陈锐,周丰,翁洪杰,等. 基于双闭环控制的柔性接地装置消弧方法[J]. 电力科学与技术学报,2015,30(4):63-70.
CHEN Rui, ZHOU Feng, WENG Hongjie, et al. Flexible grounding device with the dual-loop control method for arc suppression[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2015,30(4): 63-70.
- [8] 颜湘武,王月茹,王星海,等. 逆变器并联功率解耦及鲁棒下垂控制方法研究[J]. 电力科学与技术学报,2016,31(1):11-16.
YAN Xiangwu, WANG Yueru, WANG Xinghai, et al. Study on power decoupling and robust droop control method of parallel inverter[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2016,31(1): 11-16.
- [9] 薛尚青,蔡金锭. 风电场不同控制策略对电网电压稳定影响的分析[J]. 电力科学与技术学报,2011,26(3):57-62.
XUE Shangqing, CAI Jinding. Impacts of wind farms with different control strategies on power grids voltage stability[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2011,26(3): 57-62.
- [10] 曾祥君,胡京莹,王媛媛,等. 基于柔性接地技术的配电网三相不平衡过电压抑制方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(4):678-684.
ZENG Xiangjun, HU Jingying, WANG Yuanyuan, et al. Suppressing method of three-phase unbalanced overvoltage based on distribution networks flexible grounding control[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(4):678-684.
- [11] 彭沙沙,曾祥君,喻琨,等. 基于二次注入的配电网接地故障有源电压消弧方法[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(20):142-149.
PENG Shasha, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. Active

- arc-suppression method of grounding fault for distribution network based on secondary injection [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 142-149.
- [12] 曾祥君, 黄明玮, 王文, 等. 配电网三相不平衡过电压有源抑制方法研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(9): 61-69.
- ZENG Xiangjun, HUANG Mingwei, WANG Wen, et al. Research on active suppression method of three-phase unbalanced overvoltage for distribution networks [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(9): 61-69.
- [13] 齐郑, 李鸿毅. 孤岛模式下的微网多 PT 铁磁谐振的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 52-58.
- QI Zheng, LI Hongyi. Research on multi-PT ferroresonance in island microgrid [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 52-58.
- [14] 兰佳, 汪东, 陈娅, 等. 双级式光伏发电并网系统控制策略及仿真研究[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(4): 129-136.
- LAN Jia, WANG dong, CHEN Ya, et al. Research on control strategy and simulation of double stage photovoltaic grid connected system [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(4): 129-136.
- [15] Dan A M, Czira Z, Raisz D. Decreasing the harmonic content of the fault current during single-phase to ground faults in compensated network [C]//2009 IEEE Bucharest PowerTech, Bucharest, Romania: IEEE, 2009.
- [16] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [17] 张红洁, 董祖晨, 何晓明, 等. 适用于不同类型滤波器光伏逆变器控制策略研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(2): 20-27+82.
- ZHANG Hongjie, DONG Zuchen, HE Xiaoming, et al. Study of control strategy for PV inverter considering Impact of Filters [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 46(2): 20-27+82.
- [18] 鲍陈磊, 阮新波, 王学华, 等. 基于 PI 调节器和电容电流反馈有源阻尼的 LCL 型并网逆变器闭环参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 133-142+19.
- BAO Chenlei, RUAN Xinbo, WANG Xuehua, et al. Design of grid-connected inverters with LCL filter based on PI regulator and capacitor current feedback active damping [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 133-142+19.
- [19] Li Z P, Jiang A T, Shen P, et al. Resonance damping and parameter design method for LCL-LC filter interfaced grid-connected photovoltaic inverters [C]//2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), Hefei, China: IEEE, 2016.
- [20] 张明奇, 张英敏, 田洪江, 等. 一种 MMC 控制系统的复合校正策略[J]. 智慧电力, 2019, 47(8): 69-75.
- ZHANG Qiming, ZHANG Yingming, TIAN Hongjiang, et al. A compound correction strategy for MMC control system [J]. Smart Power, 2019, 47(8): 69-75.