

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.05.003

10 kV 串联补偿电容器对异步电动机启动的影响研究

孙先山¹, 盛跃峰¹, 赖旬阳¹, 唐圣丰², 饶崇林³, 吴丙昌³

(1. 国网浙江省电力有限公司德清县供电公司, 浙江 德清 313200; 2. 德清欣电电力建设有限公司, 浙江 德清 313200; 3. 杭州洁电科技有限公司, 杭州 310000)

摘要:目前,配电网存在的主要问题为网架薄弱、电网结构不合理、导线截面偏小、供电半径偏大、配电变压器数量和大容量电机负荷增长迅速及负荷功率偏低等,这些问题导致配电线路沿线电压跌落严重、线损高、功率因数低、输送容量小、电压闪变频繁等。为此本文首先介绍了10 kV 串联电容器补偿的工作原理、主要组成以及安装位置和容抗选择,然后分析了异步电动机等效模型,最后通过Matlab 仿真,研究了串联补偿电容器不同的安装位置、容抗的大小、并联电阻等情况下,串联补偿电容器对异步电动机启动的影响,为串联电容器补偿装置的设计和工程实践提供了有益的参考。
关键词:串联电容器补偿; 异步电动机; Matlab 仿真

Research on Influence of 10 kV Series Compensation Capacitors on Starting of Asynchronous Motors

SUN Xianshan¹, SHENG Yuefeng¹, LAI Xunyang¹, TANG Shengfeng²,
RAO Chonglin³, WU Bingchang³

(1. Deqing Power Supply Bureau, Zhejiang Electric Co., Ltd., Zhejiang Deqing 313200, China;
2. Deqing Xindian Power Construction Co., Ltd., Zhejiang Deqing 313200, China;
3. Hangzhou Jiedian Technology Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: At present, the main problems existed in the distribution network are weak network frame, unreasonable network structure, small cross sectional area of conductor, large power supply radius, fast increase of number of distribution transformer and of load of high power motor as well as low load power, leading serious voltage sag, high line loss, low power factor, small transmission capacity and frequent voltage flicker of the distribution line. For this purpose, the working principle, main composition, selection of installation position and capacitive reactance of 10 kV series capacitor compensation are introduced in this paper. Then, the equivalent model of the asynchronous motor is introduced. Finally, the influence of series compensation capacitors on the starting of asynchronous motor at such situations as different installation positions, magnitude of capacitive reactance and shunt resistance of series compensation capacitors is analyzed through Matlab simulation, which provides useful references for the design and engineering practice of series capacitor compensation devices.

Keywords: series capacitor compensation; asynchronous motor; Matlab simulation

0 引言

众所周知,电压偏差是衡量配电网供电质量的一项关键指标,他的优劣直接影响到电力用户的生产生活和国民经济的发展。而且随着精密用电设备的增多,电力用户对供电质量的要求也越来越高。

配电网是发电、变电、输电、配电电力网络的最

后一个环节,其承载着向千家万户配送合格电能的重要任务。由于以前对配电网不够重视、投资少,导致配电网的发展严重滞后,技术水平相对落后,配电设备老旧不堪,线路事故频繁发生,这严重影响了人民生活水平和国家经济发展^[1]。

目前,我国配电网存在的主要问题为网架薄弱、电网结构不合理,导线截面偏小、供电半径偏大、配电

收稿日期:2023-06-09

基金项目:浙江泰仑集团有限责任公司科技项目(HZJTKJ2022-28)。

变压器数量和大容量电机负荷增长迅速、负荷功率偏低等,这些问题导致配电线路沿线电压跌落严重、线损高、功率因数低、输送容量小、电压闪变频繁等。

针对这些问题,传统的治理措施主要有以下几种^[2-7]:1)改造配电网;2)调整负荷;3)调节配电变压器的分接开关位置;4)安装有载调压器;5)采用并联电容器补偿。随着配网串联电容器补偿技术的完善,串联电容器补偿在提升线路沿线电压、降低线路损耗、提高线路功率因数和输送容量、减小电压闪变等方面具有明显的效果,同时具有“自适应”电压调节和“实时”响应^[8]特点。因此,串联电容器补偿技术也成了提升配网供电质量的一种有效方法,目前已在配电网中得到普遍应用^[9-17]。

由于大多数配网负荷都是家用电器和厂用异步电动机,而异步电动机的启动电流一般为额定电流的4~7倍,部分国产电动机的启动电流甚至高达8~12倍^[18-20]。单台大容量异步电动机的启动或大批小容量异步电动机的集中启动引起的电压闪变不仅会影响临近用电设备的正常运行,还会导致自身无法正常启动。

以前,10 kV 配网串联电容器补偿设计的重点在于提升线路某节点的电压水平,以使其电压偏差符合国家标准,对于串联补偿电容器对异步电动机启动的影响却鲜有关注。本文通过 Matlab 仿真,对串联补偿电容器对异步电动机启动的影响进行了分析研究,以期对串联电容器补偿装置的设计和工程实践提供参考。

1 串联电容器补偿技术

1.1 工作原理

串联电容器补偿就是在配电线路某处(节点*i*、*j*之间)串接电容器组,串联补偿示意图见图1,图中*C*为串补电容器。

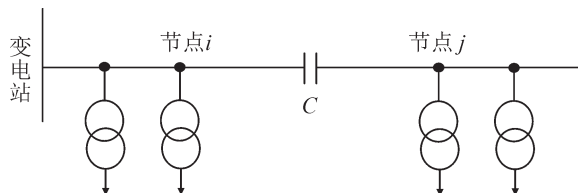


图1 串联补偿示意图

Fig. 1 Schematic diagram of series compensation

线路节点*i*和*j*之间的等效电气图见图2,图中:*R*和*X_L*为线路节点*i*和*j*之间的等效电阻和电抗;*U_i*、*U_j*分别为节点*i*、*j*的电压;*P_{j+i}*、*Q_j*为节点*j*的负荷功率;*X_c*为串联电容器容抗。

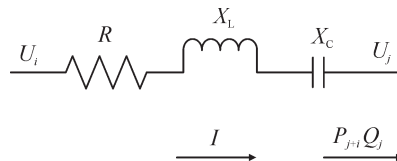


图2 串联补偿等效图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of series compensation

串联电容器未投入时,节点*i*、*j*之间的电压降 ΔU_q 为

$$\Delta U_q = U_i - U_j = \frac{P_j R + Q_j X_L}{U_j} \quad (1)$$

串联电容器投入后,节点*i*、*j*之间的电压降 ΔU_h 为

$$\Delta U_h = U_i - U_j = \frac{P_j R + Q_j X_L}{U_j} - \frac{Q_j X_c}{U_j} \quad (2)$$

由式(1)-(2)可知,串联电容器投入后,节点*i*、*j*之间的电压降减少了 $\frac{Q_j X_c}{U_j}$,这也是串联电容器补偿的电压量。根据文献[11],串联电容器的电压补偿量 U_{com} 为

$$U_{com} = \frac{Q_j X_c}{U_j} = I_L \sin \theta \cdot X_c \quad (3)$$

式中: I_L 为负载电流; θ 为负载功率因数角。

串联电容器实际补偿的无功功率 Q_c 为

$$Q_c = 3I_L^2 X_c \quad (4)$$

从式(3)-(4)可以看出,串联电容器也具有提升电压和补偿无功的功能。

1.2 主要组成

串联电容器补偿装置见图3,主要由旁路断路器、隔离开关、串联电容器、快速旁路保护单元、互感器和控制单元组成。

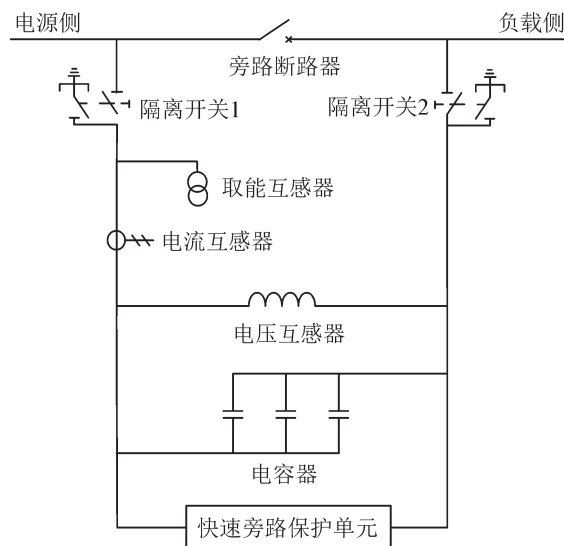


图3 串联电容器补偿装置

Fig. 3 Series capacitor compensation device

1.3 安装位置和容抗选择

由式(3)–(4)可知,串联电容器补偿的电压和无功是随着负荷电流 I_L 的变化而实时变化的,因而对快速变化、频繁波动的负荷(如异步电动机的启停、锯木厂、压碎机等类型负荷)引起的电压闪变有很好的补偿效果。串补容抗越大,补偿效果越好。

但是,由于串补电容器是串接在线路上的,对于电机类型负荷占比较大且其位置处于串补的下游时,串联电容器容抗太大容易引起谐振。因此,串联电容器补偿装置的安装位置和容抗选择要综合考虑补偿效果和谐振等因素,有时为了取得理想的效果,需要同时配置并联电容器补偿^[21–25]。

2 异步电动机等效电路模型

2.1 等效电路

根据文献[26],异步电动机的T型等效电路见图4。

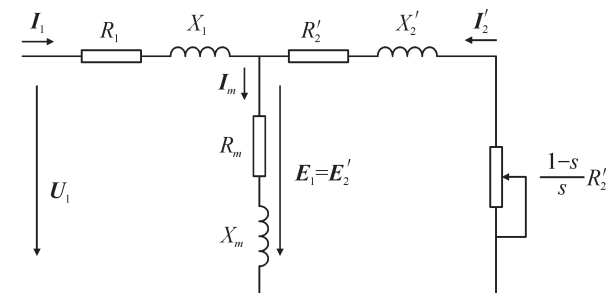


图4 异步电动机T型等效电路

Fig. 4 T-type equivalent circuit of asynchronous motor

图中: R_1 、 X_1 为定子绕组的电阻、电抗; R_2' 、 X_2' 为转子绕组折算的等效电阻、等效电抗; R_m 、 X_m 为异步电动机每相的励磁电阻、励磁电抗; s 为转差率; U_1 为定子电压; E_1 、 E_2' 为异步电动机定子、转子的电动势; I_1 、 I_2' 、 I_m 为异步电动机定子电流、转子电流、励磁电流。

2.2 基本方程式

根据图4异步电动机T型等效电路,我们可以得出其基本方程式如下:

$$U_1 = I_1(R_1 + jX_1) - E_1 \quad (5)$$

$$0 = E_2' - I_2' \left(\frac{R_2'}{s} + jX_2' \right) \quad (6)$$

$$E_1 = E_2' \quad (7)$$

$$E = -I_m(R_m + jX_m) \quad (8)$$

$$I_m = I_1 + I_2' \quad (9)$$

2.3 异步电动机启动转矩

异步电动机的转矩计算公式为

$$T = K_T \frac{spR_2U_1^2}{f_1(R_2^2 + s^2X_2^2)} \quad (10)$$

式中: T 为转矩; K_T 为常数,由电机结构决定; p 为极对数; f_1 为电源频率; R_2 、 X_2 为转子绕组的电阻、电抗。

启动瞬间 $s=1$, 异步电动机的转矩计算公式如式(11)。由此可知,当转速或转差率一定时,电磁转矩与定子电压的平方成正比。

$$T = K_T \frac{pR_2U_1^2}{f_1(R_2^2 + X_2^2)} \quad (11)$$

3 仿真研究

本文对一条带异步电动机负载的10 kV配电线路进行仿真,具体参数如下:线路电压等级10 kV,首端电压10.3 kV,线路长度10 km,线路型号LGJ-150,每千米电阻为0.21 Ω ,电抗为0.401 Ω ,线路末端负载为阻感负载(视在功率为1 MVA,额定电压400 V,功率因数0.9)加一台异步电动机(500 kVA,400 V,50 Hz,1 487 RPM,在1 s时启动)。

3.1 异步电动机在串联补偿电容器的上游

阻感负载在串补的后端,异步电动机在串补的前端,阻感负载和异步电动机分别通过1号变压器(1 250 kVA,10 000 V/400 V, $U_k=5\%$,50 Hz)和2号变压器(630 kVA,10 000 V/400 V, $U_k=5\%$,50 Hz)连接到10 kV配电线路上。图5和图6分别为串补($X_c=4.01$)切除和投入情况下,异步电动机的定子电压和转子速度曲线。从图中可以看出,当异步电动机在串联补偿电容器的上游时,串补可以略微提升电机定子电压幅值、缩短启动时间,但影响非常小,可基本忽略不计。

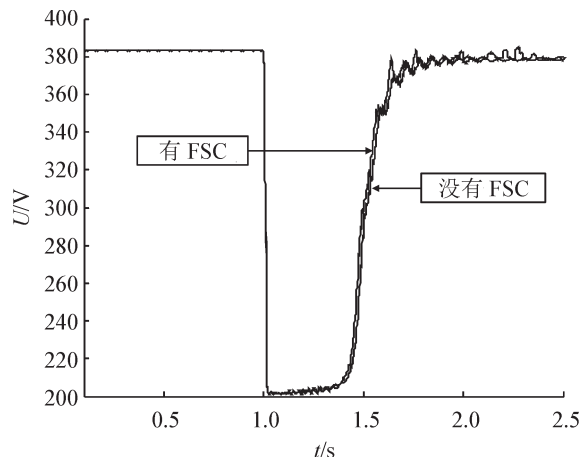


图5 定子电压曲线(异步电动机在串补电容器的上游)
Fig. 5 Stator voltage curve (asynchronous motor is located at upstream of series compensation capacitor)

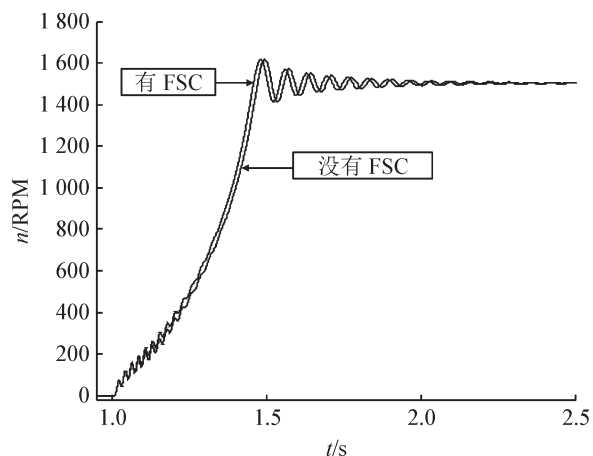


图6 转子速度曲线(异步电动机在串补电容器的上游)
Fig. 6 Rotor speed curve (asynchronous motor is located at upstream of series compensation capacitor)

3.2 电动机在串联补偿电容器的下游

阻感负载和异步电动机均在串补的后端,他们通过变压器(2 000 kVA, 10 000 V/400 V, $U_k=5\%$, 50 Hz)连接到 10 kV 配电线路上。串补(不同容抗)切除及投入情况下,定子电流曲线(异步电动机在串补、电容器的下游)图见图 7,定子电压曲线(异步电动机在串补电容器的下游)图见图 8,转子速度曲线(异步电动机在串补电容器的下游)图见图 9。从图 7-9 中可以看出,当异步电动机在串联补偿电容器的下游时,串补有效提升了电机定子电压幅值,缩短了转子达到额定转速的时间。随着容抗增大,定子电压提升越多,转子达到额定转速的时间越短。但同时随着容抗增大,定子电压和转子转速达到稳定的时间越长,当 $X_c=4.01$ 时,定子电压和转子转速出现振荡放大现象,电机已无法稳定运行。

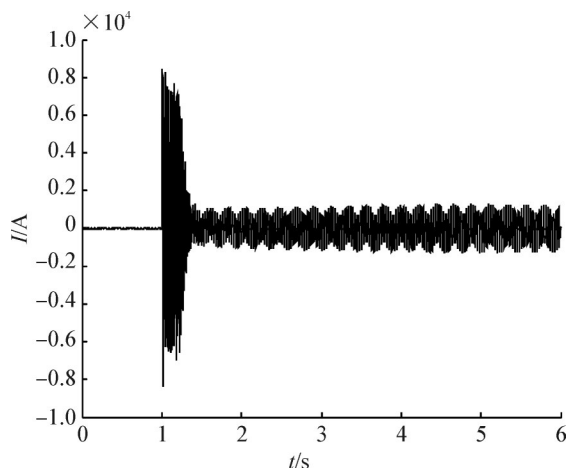
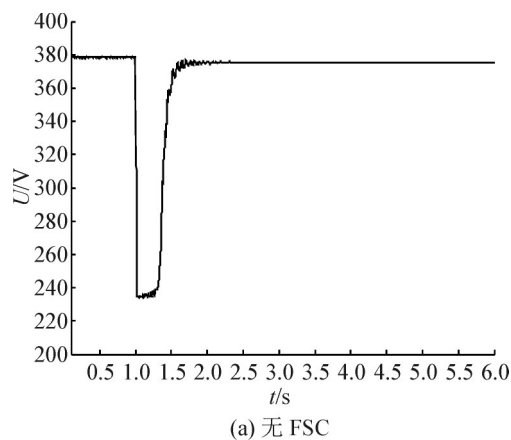
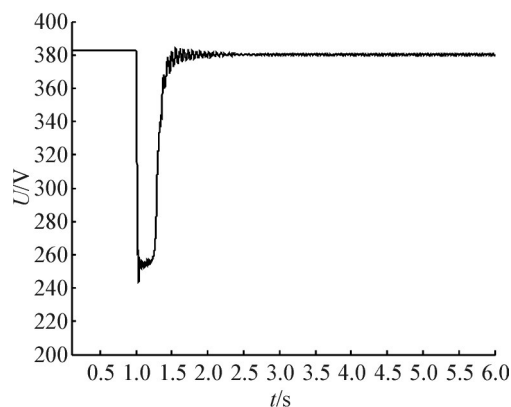


图7 定子电流曲线(异步电动机在串补电容器的下游, $X_c=4.01$)

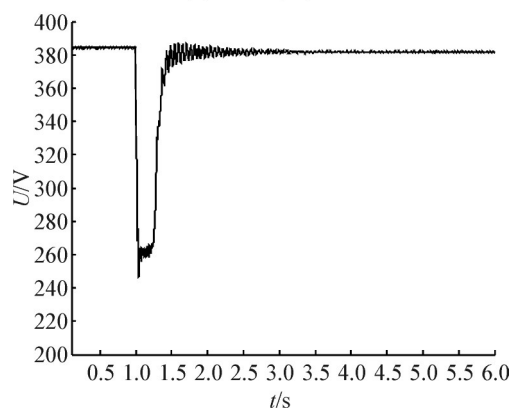
Fig. 7 Stator current curve (asynchronous motor is located at downstream of series compensation capacitor, $X_c=4.01$)



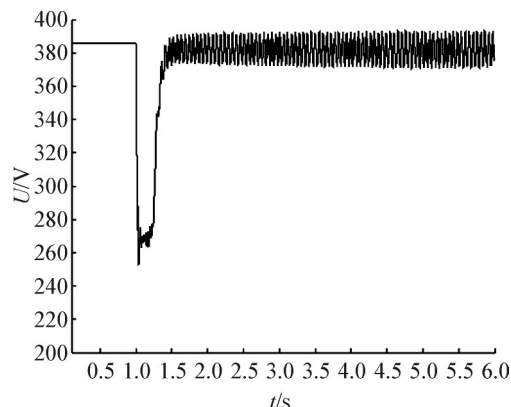
(a) 无 FSC



(b) 有 FSC, $X_c=2.406$



(c) 有 FSC, $X_c=3.208$



(d) 有 FSC, $X_c=4.01$

图8 定子电压曲线(异步电动机在串补电容器的下游)
Fig. 8 Stator voltage curve (asynchronous motor is located at downstream of series compensation capacitor)

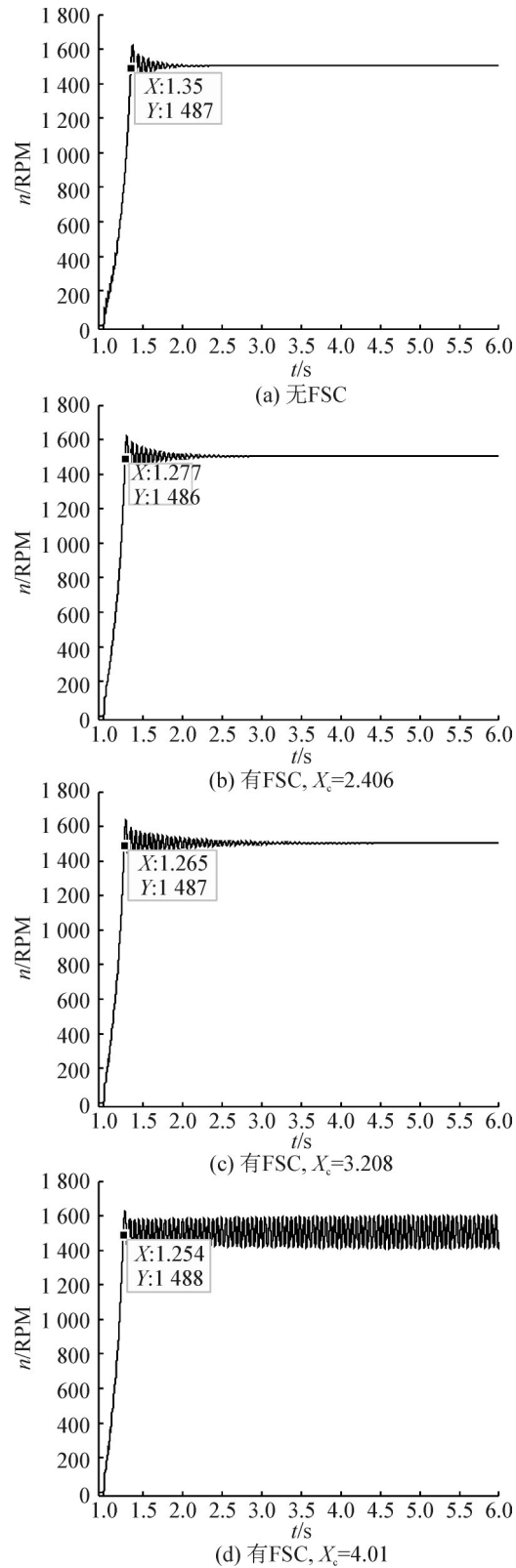


图9 转子速度曲线(异步电动机在串补电容器的下游)
Fig. 9 Rotor speed curve (asynchronous motor is located at downstream of series compensation capacitor)

3.3 电动机在串联补偿电容器的下游,串联补偿电容器并联电阻

阻感负载和异步电动机均在串补的后端,他们

通过变压器(2 000 kVA, 10 000 V/400 V, $U_k=5\%$, 50 Hz)连接到 10 kV 配电线路上。图 10-11 分别为串联补偿电容器(容抗 $X_c=4.01$)并联电阻 R_c (不同阻值)的情况下,异步电动机的定子电压和转子速度曲线。从图中可以看出,当异步电动机在串联补偿电容器的下游且出现振荡现象时,在串联补偿电容器两端并联合适阻值的电阻可以消除定子电压振荡,使电机稳定运行;在可消除振荡的阻值范围内,随着阻值增大,转子达到额定转速的时间越短。

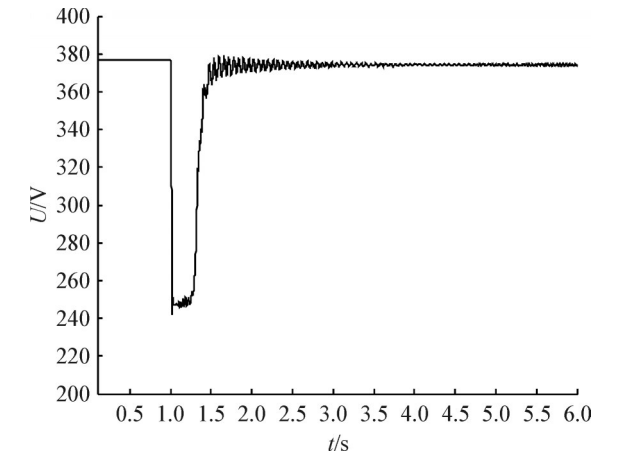


图10 定子电压曲线(异步电动机在串补电容器的下游,并联电阻 $R_c=5\Omega$,其他阻值波形类似)
Fig. 10 Stator voltage curve (asynchronous motor is located at downstream of series compensation capacitor, parallel resistance $R_c=5\Omega$, with similar waveform for other resistance values)

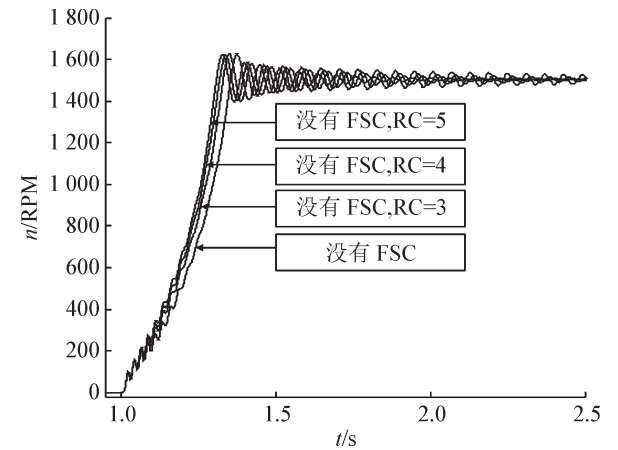


图11 转子速度曲线(异步电动机在串补电容器的下游,串联补偿电容器并联电阻)
Fig. 11 Rotor speed curve (asynchronous motor is located at downstream of series compensation capacitor, with parallel connection of resistor in series compensation capacitor)

4 结语

通过 Matlab 仿真,研究了串联补偿电容器的安

装位置、容抗的大小以及并联电阻阻值的大小对异步电动机启动的影响。当异步电动机在串补的上游时,串补对异步电动机启动的影响很小,可忽略不计;当异步电动机在串补的下游时,串补缩短了电机启动时间,但随着容抗增大,电机启动后达到稳定运行的时间越长,当容抗达到某个值后,定子电压和转子速度出现振荡现象,电机已无法稳定运行。另外,在串联补偿电容器两端并联合适阻值的电阻可消除振荡,缩短启动时间。

综上所述,对于异步电动机占比较高的10 kV配电线路,为了得到理想的补偿效果,同时又避免谐振,必须谨慎选择串补的安装位置和容抗大小,本文的仿真为串联电容器补偿装置的设计和工程实践提供了有益的指导。

参考文献

- [1] 梁振峰. 关于配网低电压问题的研究[J]. 科技创新与应用, 2015(36): 175-175.
LIANG Zhenfeng. Research on the problem of low voltage in distribution network[J]. Technology Innovation and Application, 2015(36): 175-175.
- [2] 卓谷颖. 改善配网电压质量的固定串补技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [3] 杨卫朋, 张爱民, 李俊刚, 等. 10 kV 交流配电网升级改造不同方案的对比分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(20): 217-223.
YANG Weipeng, ZHANG Aimin, LI Jungang, et al. Comparative analysis on different upgrading and reform schemes for 10 kV AC power distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(20): 217-223.
- [4] 孙惠娟, 姜磊, 钱锟, 等. 10 kV 配电网低电压问题及其改造研究[J]. 华东交通大学学报, 2017, 34(5): 120-126.
SUN Huijuan, JIANG Lei, QIAN Kun, et al. Research on problems and improvement of 10 kV low voltage distribution network[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2017, 34(5): 120-126.
- [5] 张富裕, 秦榛. 基于单相有载调压器的配电网低压治理方法研究[J]. 电子设计工程, 2018, 26(10): 189-193.
ZHANG Fuyu, QIN Zhen. Research on low voltage control method of distribution network based on single phase on-load voltage regulator[J]. Electronic Design Engineering, 2018, 26(10): 189-193.
- [6] 郭光耀. 10 kV 农村配电网无功补偿及电压调节措施的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [7] 谢睿. 谐波对配电网并联电容器的影响与对策研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [8] 梁一桥, 吕佳铭. 10 kV 配网智能串联补偿装置研制及其工程应用[J]. 电网技术, 2014, 38(S2): 220-225.
LIANG Yiqiao, LYU Jiaming. Development and engineering application of intelligent series compensation device for 10 kV distribution network[J]. Power System Technology, 2014, 38(S2): 220-225.
- [9] 卓谷颖. 配网固定串补和并补的比较. 2012年电力系统年会, 2012.
- [10] 雷宪章, D. Povh. 串联补偿技术在远距离高电压交流输电系统中的应用[J]. 电网技术, 1998, 22(11): 34-38.
LEI Xianzhang, D. Povh. Series compensation for a long distance AC transmission system[J]. Power System Technology, 1998, 22(11): 34-38.
- [11] 卓谷颖, 江道灼, 梁一桥, 等. 改善配网电压质量的固定串补技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 61-67.
ZHUO Guying, JIANG Daozhuo, LIANG Yiqiao, et al. A research of D-FSC for improving voltage quality in distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 61-67.
- [12] 王笑荣, 王曜飞, 宋亚夫, 等. 串补解决10 kV 配电线路高压与低压问题的研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(2): 33-37.
WANG Xiaotang, WANG Yaofei, SONG Yafu, et al. Research on series capacitor compensation technique solving 10 kV distribution line high-voltage and low-voltage problems[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(2): 33-37.
- [13] 赵文忠, 王东平. 串联无功补偿技术在配网中的应用分析[J]. 低压电器, 2010(5): 37-39.
ZHAO Wenzhong, WANG Dongping. Application analysis of series reactive power compensation in distribution network[J]. Lower Voltage Apparatus, 2010(5): 37-39.
- [14] ROBERT ARTHURBARR. Series compensation of distribution and subtransmission lines[D]. Department of ECE, University of Wollongong, 1997.
- [15] 据泽立, 侯喆, 蒲路, 等. 10 kV 配电网典型负荷结构串联电容补偿临界补偿长度研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(1): 25-29.
JU Zeli, HOU Zhe, PU Lu, et al. Study on critical compensation length of series capacitor compensation for typical load structure of 10 kV distribution network[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(1): 25-29.
- [16] 张波, 董煜轩, 任菲, 等. 配电网串联补偿技术探讨[J]. 电力电容器与无功补偿, 2016, 37(3): 51-55.
ZHANG Bo, DONG Yuxuan, REN Fei, et al. Discussion on series compensation technology of distribution network[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2016, 37(1): 51-55.
- [17] 邹旻昊, 周力行, 李秀俊, 等. 基于 Matlab 的10 kV 配电线路串联补偿能效分析软件开发[J]. 电力电容器与无功

- 补偿,2019,40(4):22-27.
- ZOU Minhao,ZHOU Lixing,LI Xiujun,et al. Development of series compensation energy efficiency analysis software for 10 kV distribution lines based on matlab platform[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2019,40(4):22-27.
- [18]郭秀翠. 三相鼠笼式异步电动机的启动控制[J]. 中国修船. 2002(5):23-26.
- GUO Xiucui. The starting control of three-phase asynchronous motor[J]. China Ship Repair. 2002(5):23-26.
- [19]童玲,王志新,张华强,等. 异步电动机软启动技术及转矩控制仿真研究[J]. 电气传动,2010,40(4):43-47.
- TONG Ling,WANG Zhixin,ZHANG Huaqiang,et al. Technology of asynchronous motor soft starter and simulation research for torque control strategy[J]. Electric Drive,2010,40(4):43-47.
- [20]刘石生,谢文,邝伟明,等. 10 kV 异步电动机启动冲击的对策[J]. 南方电网技术,2014,8(3):91-94.
- LIU Shisheng,XIE Wen,KUANG Weiming,et al. Countermeasures to the start impact of 10 kV Asynchronous motors [J]. Southern Power System Technology,2014,8(3):91-94.
- [21]林峰,梁一桥,吕佳铭,等. 10 kV 配电线路串、并联混合电容器补偿技术研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2019,40(3):10-15.
- LIN Feng,LIANG Yiqiao,LYU Jiaming,et al. Study on compensation technology of series and parallel mixed capacitor at 10 kV distribution line[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2019,40(3):10-15.
- [22]梁一桥. 一种基于分散式串、并联补偿及其智能控制的 10 kV 配电网全局无功和电压优化系统[P]. 中国专利:202010454540. 2,2020.
- [23]梁一桥,吕佳铭,饶崇林. 10 kV 配电线路串、并联混合型电容补偿装置[P]. 中国专利:201610062403. 8,2016.
- [24]徐晓刚,黄嘉健. 面向配电网无功补偿协同优化的混合算法[J]. 自动化技术与应用,2018,37(2):10-15.
- XU Xiaogang,HUANG Jiajian. Hybrid algorithm for coordinated optimization of reactive power compensation in distribution network[J]. Techniques of Automation and Applications,2018,37(2):10-15.
- [25]刘树枫,王浩,吴钢,等. 考虑串联补偿和并联补偿的配电网优化[J]. 电力电容器与无功补偿,2019,40(6):18-23.
- LIU Shufeng,WANG Hao,WU Gang,et al. Distribution network optimization considering series and shunt compensation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2019,40(6):18-23.
- [26]唐介. 电机与拖动. 第2版[M]. 高等教育出版社,2007.
- 作者简介:**
- 孙先山(1982—),男,高级工程师,从事配电网运维检修管理工作。
- 盛跃峰(1979—),男,高级工程师,从事配网调度管理工作。
- 赖旬阳(1987—),男,工程师,从事配网调度工作。
- 唐圣丰(1980—),男,工程师,从事电力系统及其自动化工作。
- 饶崇林(1976—),男,工程师,从事电力电子技术在电力系统中的应用研究工作。E-mail:chonglin-rao@163.com。
- 吴丙昌(1999—),男,助理工程师,从事电力电子技术在电力系统中的应用研究工作。