

配电网串联电容补偿对电机机端电压调节性能的影响

周 封¹, 肖 强¹, 刘志刚², 王丙全¹, 王晨光¹, 刘 健¹

(1. 哈尔滨理工大学电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 中国海诚工程科技股份有限公司, 上海 200031)

摘要: 电力系统配电网中一般有更多的波动性或冲击性电动机负载, 造成电压偏低、波动严重, 严重影响电能质量和电机的运行性能。针对这一问题, 提出采用串联电容就近对电动机进行补偿的方法, 计及电机的负载特性, 通过对比计算确定了在配电变压器高压侧进行串补对机端电压调节的效果最好。仿真计算了波动性负荷情况下串补装置不同补偿方式对电机机端电压调节性能的影响。结果表明: 采用低度过补偿方式, 可以在避免自激的情况下, 在较大的范围内提升线路末端电机的电压性能, 消除由于波动性负荷引起的电压波动, 为配电网中改善电动机的运行性能和机端电压质量提供了一条新的思路。

关键词: 配电网; 串联电容补偿; 电动机; 自激; 电压调节; 节能

Effects of regulating performance of voltage at the motor terminals with series capacitance compensation in distribution network

ZHOU Feng¹, XIAO Qiang¹, LIU Zhigang², WANG Bingquan¹, WANG Chenguang¹, LIU Jian¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 2. China Haisum Engineering Co., Ltd., Shanghai 200031, China)

Abstract: Voltage becomes a little lower and fluctuates seriously caused by fluctuating or impact motor loads in distribution network of power system, which influences the quality of electric energy and the operation performance of motors. A method of using series capacitors to compensate motors nearby is proposed to solve that problem. Considering the load characteristics of the motors, it concludes that regulating performance of voltage at the motor terminals is most effective when series capacitors are on the high voltage side of distribution transformer by comparing and calculating. It simulates and calculates the effects of voltage regulating performance at the motor terminals caused by series compensation device in different compensation modes. The results show that it can improve the voltage performance of motors at the ends of the line with a wide range and eliminate the voltage fluctuation caused by fluctuating loads on the condition that self-excitation is avoided when the capacitors are light over-compensated mode. It provides a new idea to improve the operation performance of motors and the quality of voltage at the motor terminals in distribution network.

Key words: distribution network; series capacitance compensation; motor; self-excitation; voltage regulating; energy conservation

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)08-0107-08

0 引言

随着电力系统的不断发展和扩大, 配电网规模日益庞大, 接线越来越复杂^[1], 对于一些油田、煤矿的供电线路, 往往就近接入市政或农村变电所的6 kV或10 kV母线。由于油井、矿井距离降压变电

所较远^[2], 配电线路的延伸长度和送电功率也相应地不断增加, 配电变压器数量多, 供电半径大, 较多线路带有多台大容量的感应电动机或变化迅速的冲击性负载, 往往导致线路末端电压过低、波动较大^[3-4], 同时, 配电网用户大量精密电子设备的应用对系统电压稳定性要求越来越高, 使得配电网电压质量迫切需要得到优化^[5]。

对于配网上的大量感应电动机来说, 当电压降

基金项目: 黑龙江省科技计划(攻关)项目(GZ11A213)

低时, 转矩显著减小, 设备起动困难, 如果所带的机械负载不变, 则转差率增大, 定子电流随之增大, 温度上升, 严重时会因电磁转矩太小而停转, 烧毁电动机。这样, 不但影响设备的安全运行, 而且直接影响油田、煤矿企业的生产效益^[2,6]。因此, 提升配电线路末端电压、抑制电压波动十分必要。

通过在配电线路中串联电容器, 补偿配电线路中的电抗来减少在配电线路阻抗上的电压损耗^[7], 是一种改善电压质量和提高送电容量的有效措施。由于线路上冲击负荷导致电网电压剧烈波动时, 某些常用的分档调压设备不能有效抑制这类电压波动, 对于快速变化的负荷, 补偿速度是影响补偿效果的关键因素, 因此不需要变压器降压的直接补偿具有这方面的独特优势^[8], 串联电容器作为一种无延迟的连续调压设备, 能随负荷变化自动连续调节配电网电压, 可以有效消除电压波动, 并且投资低廉、维护费用低^[9-10]。

但是, 采用串联电容补偿装置也带来一些特殊问题。在中低压线路中, 当串联电容补偿度很大时, 可能会发生线路受电端感应电动机自激现象^[11]。在发生自激时, 电流和电压剧烈振荡, 电机转速显著降低, 还可能出现串联电容器的保护间隙连续击穿的现象。因此, 在发生自激时, 必须采取相应的措施来平息振荡, 保证负载的正常运行, 并使电机不因过电流发热而受到损坏^[9]。

目前, 串联电容补偿装置在高压、特高压输电网中主要起到提高稳定极限, 增强输送能力和调节潮流分配等作用^[12-14], 得到了广泛的应用; 在中压配电网中主要用来补偿线路的感性压降, 调整配电网电压; 而为了改善电动机的运行性能和机端电压质量, 同时还可实现节能而直接对电动机进行串联电容补偿, 尚无相关的研究。

本文首先将串联电容补偿装置依次安装在配电变压器 380 V 侧与 6 kV 侧进行升压性能的计算与仿真, 通过对比确定串补装置最佳安装位置; 然后使串联电容补偿装置依次工作在高度过补偿与低度过补偿状态下, 对波动性负荷引起的电压波动的抑制性能进行计算与仿真, 通过对比确定串补装置最佳补偿方式; 最后针对感应电动机自激问题进行了分析, 简要分析了几种克服自激的方法。

1 电机机端串补理论分析与基本假设

根据经验, 电力系统配电网中以调压为主要目的的串联电容补偿装置一般都采用过补偿方式, 补

偿度一般在 1~4 之间, 并且大负荷时提升电压高, 小负荷时提升电压低, 可以削弱由于波动性负荷引起的电压波动。对于这种常规的串补方式, 由于串补装置多应用在中、高压等级的电网中, 电压等级越高, 相应的容量也越大, 个别感应电动机负载对电网总容量的影响可以忽略不计, 近似认为电网总负荷不变, 不受电网电压影响, 负荷采用的是恒功率模型, 提升电压 $\Delta U = \frac{QX_c}{U}$, 由于无功负荷 Q 恒定, 系统首端电压 U 恒定, 电容电抗 X_c 越大, ΔU 越大, 电压升高越高, 甚至出现受电端电压高于系统首端电压的情况, 可以认为变量 ΔU 是关于变量 X_c 的正比例函数。

而在中、低压配电网直接对电动机进行串联电容补偿, 负载本身也受电网电压的影响, 无法保证 Q 值不变, 负荷模型不能视为恒功率模型, 因此, 本文作了一系列的假设条件以便于进行近似的理论分析:

- 1) 只考虑负载所需的有功功率和无功功率, 不计转差率的变化, 将感应电动机视为恒定的 RL 串联阻抗模型;
- 2) 认为 6 kV 以上系统中有比较完善的调压措施, 能够维持 6 kV 母线电压基本不变, 母线视为恒定的电压源;
- 3) 忽略变压器的绕组电阻、漏抗和励磁支路, 只计变比;
- 4) 忽略 6 kV 系统中输电线路的对地导纳支路, 只计阻抗;
- 5) 忽略 380 V 系统中输电线路。

按照上述假设条件, 设系统首端电压为 \dot{U} , 输电线路阻抗为 $R+jX$, 负载阻抗为 $R_1'+jX_1'$, 串联电容器的容抗为 X_c , 则负载电压 $\dot{U}' = \frac{R_1' + jX_1'}{R+jX - jX_c + R_1' + jX_1'} \dot{U}$, 只要电容器的电容值选择得当, 即可满足 $|\dot{U}'| > |\dot{U}|$, 实现了负载电压的提升, 但实际过程要比较复杂, 还需要进一步通过仿真验证。

2 串补装置合理安装位置的分析与确定

2.1 恒定负载情况下不同安装位置的理论分析

串联电容补偿装置可以就近安装在配电变压器低压侧或高压侧, 针对两种不同安装位置的情况进行理论分析, 比较两种方案的提升电压效果。

如图 1 所示, 将串联电容补偿装置安装在配电变压器低压侧 380 V 系统中, 负载电压 $|\dot{U}'| =$

$|\frac{R_1 + jX_1}{-jX_c + R_1 + jX_1} \dot{U}| = |\frac{R_1 + jX_1}{R_1 + j(X_1 - X_c)} \dot{U}|$, 显然当 $X_c = X_1$ 时, $|\dot{U}'|$ 取到最大值 $|\frac{\sqrt{R_1^2 + X_1^2}}{R_1} \dot{U}|$, 最大电压为额定电压的 $\frac{\sqrt{R_1^2 + X_1^2}}{R_1}$ 倍。

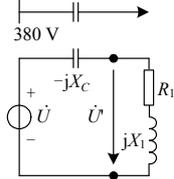


图 1 配电网 380 V 侧串联电容补偿模型

Fig. 1 Model of series capacitance compensation in 380 V distribution network

如图 2 所示, 将串联电容补偿装置安装在配电变压器高压侧 6 kV 系统中, 将负载阻抗归算到变压器的高压侧, 即 $R_1' = k^2 R_1$, $X_1' = k^2 X_1$, 负载电压 $|\dot{U}'| = |\frac{R_1' + jX_1'}{R + jX - jX_c + R_1' + jX_1'} \dot{U}| = |\frac{R_1' + jX_1'}{(R_1' + R) + j(X_1' + X - X_c)} \dot{U}|$, 当 $X_c = X_1' + X$ 时, $|\dot{U}'|$ 取到最大值 $|\frac{\sqrt{R_1'^2 + X_1'^2}}{R_1' + R} \dot{U}|$, 由于 $R \ll R_1'$, 最大电压为额定电压的 $\frac{\sqrt{R_1'^2 + X_1'^2}}{R_1' + R} \approx \frac{\sqrt{R_1'^2 + X_1'^2}}{R_1'} = \frac{\sqrt{R_1^2 + X_1^2}}{R_1}$ 倍。

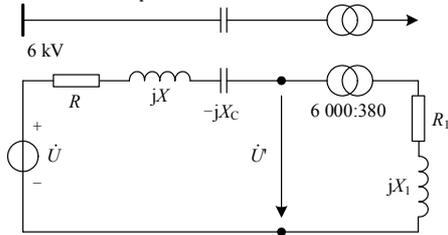


图 2 配电网 6 kV 侧串联电容补偿模型

Fig. 2 Model of series capacitance compensation in 6 kV distribution network

通过理论分析比较可以得出结论, 串补装置安装位置不同对提升电压效果影响不大。

2.2 恒定负载情况下不同安装位置的仿真验证

对于配电变压器低压侧直接带电动机负载的情况, 串补装置安装位置不同对电动机电压的调节性能是否相近需要作具体分析, 针对这两种情况进行仿真验证, 采用的电动机型号为 Y315-8S, 其参数如表 1 所示。

首先将串联电容补偿装置安装在 380 V 系统中, 仿真模型如图 3 所示, 电动机接入串联电容补偿装置后, 直接投入 380 V 配电网中, 电动机负载

采用斜率 100 N·m/s 的斜坡函数加载, 经过 7.1 s 达到额定转矩, 停止加载。其中, 感应电动机模块的定子和转子绕组为 Y 型接法, 实际的 Y315-8S 型号电机为 Δ 型接法, 仿真时, 线电压有效值应该视为 660 V, 峰值应该视为 933 V。

表 1 Y315-8S 型号电动机的参数

Table 1 Parameters of Y315-8S motor

额定功率	$P_N = 55 \text{ kW}$	效率	$\eta = 92.0\%$
额定电压	$V_N = 380 \text{ V}$	级数	$p = 8$
功率因数	$\cos\phi = 0.8$	转差率	$s = 0.0127$
定子电阻	$R_1 = 0.0907 \Omega$	定子电抗	$X_{1\sigma} = 0.5040 \Omega$
转子电阻	$R_2' = 0.0865 \Omega$	转子电抗	$X_{2\sigma}' = 0.8466 \Omega$
激磁电抗	$X_m = 13.7931 \Omega$	转动惯量	$J = 2.3 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$

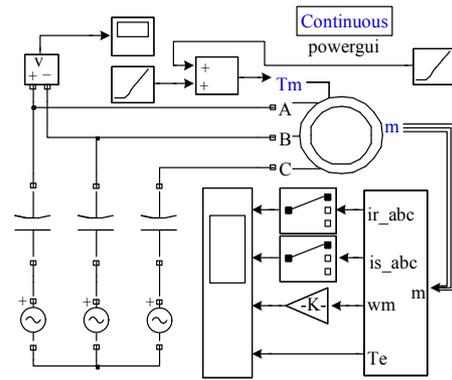


图 3 配电网 380 V 侧串联电容补偿仿真模型

Fig. 3 Simulation model of series capacitance compensation in 380 V distribution network

经过仿真分析, 串联电容 $C = 0.011 \text{ F}$ 时, 升压性能最好, 使电动机正常运行时的定子侧电压最大, 如图 4 所示。如果电容小于该值, 电机将进入自激区, 从而出现自激现象。

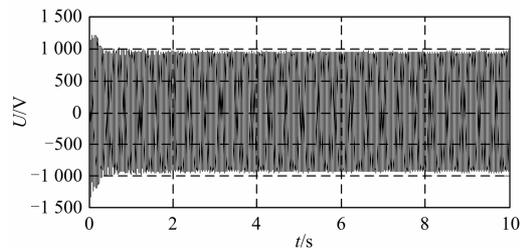


图 4 串联 0.011 F 电容时电机定子电压波形

Fig. 4 Voltage waveform of motor stator when series capacitor is 0.011 F

从图 4 可以看出, 串联电容后, 提升的电压有效值不到 20 V, 考虑到实际 380 V 配电网允许 7%

的电压波动为 27 V，因此将串联电容补偿装置安装在 380 V 配电网中，升压性能并不理想，不符合经济性原则。

其他条件不变，将串联电容补偿装置安装在配电变压器高压侧 6 kV 配电网中，如图 5 所示。6 kV 电源经过 6 km 的 LGJ-120 导线连接串联电容器，然后连接变比为 6 000: 660 的变压器，其他电气结构同图 3。由大到小逐渐改变电容器的电容值，观察电机定子侧电压波形及电机输出波形变化情况。

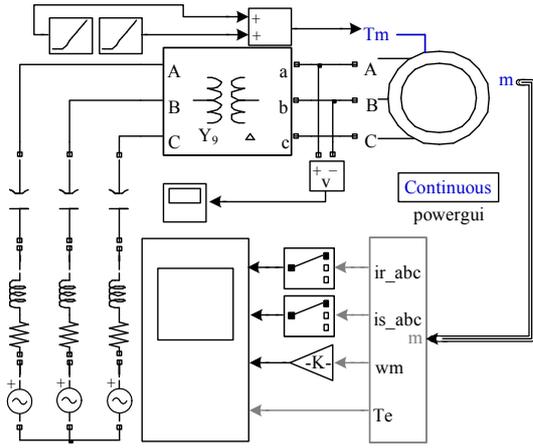


图 5 配电网 6 kV 侧串联电容补偿仿真模型

Fig. 5 Simulation model of series capacitance compensation in 6 kV distribution network

经过仿真分析，可绘出电容器的电容值与电机定子侧电压峰值的关系曲线，如图 6 所示，呈现出多段不同的特性。

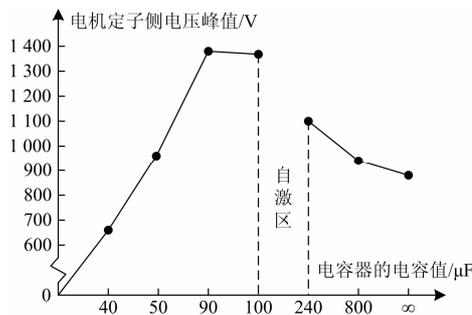


图 6 定子电压峰值与串联电容值的关系曲线

Fig. 6 Curve of relationship between peak voltage of stator and series capacitance

1) 当电容器的电容值为无穷大时，此时相当于短路，电机定子侧电压峰值为 880 V；

2) 当电容器的电容值逐渐减小时，电机定子侧电压峰值也随之上升；

3) 当电容器的电容值为 800 μF 时，电机定子侧电压峰值为 940 V，接近电机额定值 933 V；

4) 当电容器的电容值在 100~240 μF 范围内时，将会出现自激区，电压振荡剧烈；

5) 当电容器的电容值为 90 μF 时，电机定子侧电压峰值达到最大值 1 380V；

6) 当电容器的电容值继续逐渐减小时，电机定子侧电压峰值则开始下降；

7) 当电容器的电容值为 50 μF 时，电机定子侧电压峰值为 955 V，接近电机额定值 933 V；

8) 当电容器的电容值为 40 μF 时，电机定子侧电压峰值为 655 V，如果电机定子侧电压峰值小于此值，电机将无法满载运行。

显然，电容器的电容值在 50~100 μF 与 240~800 μF 范围内可以提升电压，并且提升能力较大。

2.3 合理安装位置的确定

通过仿真结果比较，对于配电变压器低压侧直接带电动机负载的情况，将串联电容补偿装置就近安装在配电变压器高压侧 6 kV 系统中比配电变压器低压侧 380 V 系统中具有较强的提升电压能力，这是由于 6 kV 配电线路中安装了配电变压器，有利于克服电机发生自激，改善调压性能。但是从实际应用角度考虑，低压侧安装串补装置成本较低，维护相对容易，更有利于实施。

3 串补装置合理补偿方式的分析与确定

3.1 波动性负载情况下不同补偿方式的理论分析

如图 7 所示，将串联电容补偿装置安装在配电变压器高压侧，配电变压器低压侧存在波动性负载，将负载阻抗归算到配电变压器高压侧，最大负荷时，相应的负载阻抗为 $R_3' = R_1' // R_1' // R_1' = \frac{R_1'}{3}$ ， $X_3' = X_1' // X_1' // X_1' = \frac{X_1'}{3}$ 。电容值按照最大负荷情况下进行选择，保证最大负荷时负载电压为额定值，各用电设备能够工作于额定状态。

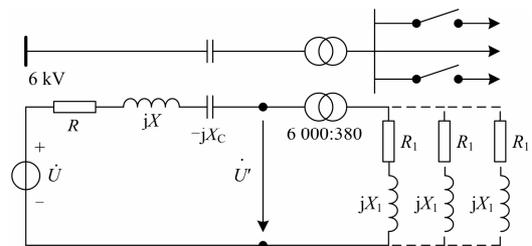


图 7 具有波动性负荷的 6 kV 配电网模型

Fig. 7 Model of 6 kV distribution network with fluctuating loads

$$\text{由于 } \dot{U}' = \frac{R' + jX_3'}{R + jX - jX_C + R_3' + jX_3'} \dot{U}, \text{ 欲使 } |\dot{U}'| = |\dot{U}|,$$

必有 $|R_3'+jX_3'|=|R+jX-jX_C+R_3'+jX_3'|$, 即 $R_3'^2+X_3'^2=(R+R_3')^2+(X-X_C+X_3')^2$, 得到 $X_C=X_3'+X-\sqrt{X_3'^2-R^2-2RR_3'}$ (低度过补偿)或 $X_C=X_3'+X+\sqrt{X_3'^2-R^2-2RR_3'}$ (高度过补偿)。

低度过补偿时, 将 $X_C=X_3'+X-\sqrt{X_3'^2-R^2-2RR_3'}$ 代入, $|\dot{U}'|=\frac{\sqrt{R'^2+X'^2}}{\sqrt{(R'+R)^2+(X'-X_3'+\sqrt{X_3'^2-R^2-2RR_3'})^2}}|\dot{U}|$ ($X'\geq X_3'$), 对 $\frac{X'-X_3'+\sqrt{X_3'^2-R^2-2RR_3'}}{X'}$ 进行分析, 由于 $R^2+2RR_3'\ll X_3'^2$, 因此 $\frac{X'-X_3'+\sqrt{X_3'^2-R^2-2RR_3'}}{X'}$ 略小于1, 且 X' 越大, 越接近1, 得到 $|\dot{U}'|\approx|\dot{U}|$, 即负荷波动时, 电压波动较小, 维持在额定电压附近。

高度过补偿时, 将 $X_C=X_3'+X+\sqrt{X_3'^2-R^2-2RR_3'}$ 代入, $|\dot{U}'|=\frac{\sqrt{R'^2+X'^2}}{\sqrt{(R'+R)^2+(X'-X_3'-\sqrt{X_3'^2-R^2-2RR_3'})^2}}|\dot{U}|$ ($X'\geq X_3'$), 对 $\frac{X'-X_3'-\sqrt{X_3'^2-R^2-2RR_3'}}{X'}$ 进行分析, 由于 $R^2+2RR_3'\ll X_3'^2$, 因此 $\frac{X'-X_3'-\sqrt{X_3'^2-R^2-2RR_3'}}{X'}\approx 1-\frac{2X_3'}{X'}$ 。

1) 最大负荷时, $X'=X_3'$, $1-\frac{2X_3'}{X'}=-1$, $|\dot{U}'|\approx|\dot{U}|$, 负载电压为额定电压;

2) 负荷逐渐减小时, 例如三分之二负荷时, $X'=X_1'/X_1'=\frac{3X_3'}{2}$, $-1<1-\frac{2X_3'}{X'}=-\frac{1}{3}<0$, $|\dot{U}'|>|\dot{U}|$, 负载电压逐渐增加;

3) 负荷减小到 $X'=2X_3'$ 时, $1-\frac{2X_3'}{X'}=0$, $|\dot{U}'|\approx\frac{\sqrt{R_1'^2+X_1'^2}}{R_1'+R}|\dot{U}|>|\dot{U}|$, 此时负载电压达到最大值;

4) 负荷继续逐渐减小时, 例如三分之一负荷时, $X'=X_1'/3X_3'$, $0<1-\frac{2X_3'}{X'}=\frac{1}{3}<1$, $|\dot{U}'|>|\dot{U}|$, 负载电压逐渐减小;

5) 空载时, $X'=\infty$, $1-\frac{2X_3'}{X'}=1$, $|\dot{U}'|=|\dot{U}|$, 电压为额定电压。

负荷从最大负载逐渐减小至空载时, 电压波动剧烈, 由额定电压逐渐增大再逐渐减小, 如果投入负载不当, 就会有较大的电压冲击。

3.2 波动性负载情况下不同补偿方式的仿真验证

配网电动机运行时, 波动性负载最为常见, 也是对电压影响较大的工作方式。波动性负载采用动

态感应电动机模型, 电容值按照最大负荷情况下进行选择, 分析串补装置不同补偿方式对波动性负荷引起的电压波动的影响, 以确定合理的串补参数, 仿真模型如图8所示。

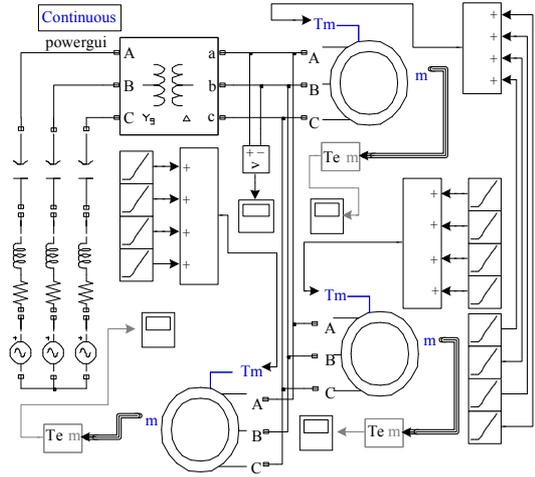


图8 具有波动性负荷的6 kV配电网仿真模型

Fig. 8 Simulation model of 6 kV distribution network with fluctuating loads

1) 取串联电容 $C=59\mu\text{F}$, 此时线路为高度过补偿, 系统呈容性。

首先三台电机同时空载起动; 第5s时, 第一台电机开始加载, 直到满载运行; 第15s时, 第二台电机开始加载, 直到满载运行; 第25s时, 第三台电机开始加载, 直到满载运行; 第35s时, 第三台电机开始减载, 直到空载运行; 第45s时, 第二台电机开始减载, 直到空载运行; 第55s时, 第一台电机开始减载, 直到空载运行。仿真时间持续70s, 负载电压波形如图9所示。

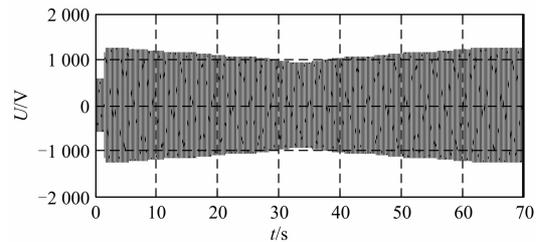


图9 串联59 μF电容时电机定子电压波形

Fig. 9 Voltage waveform of motor stator when series capacitor is 59 μF

2) 取串联电容 $C=800\mu\text{F}$, 此时线路为低度过补偿, 系统呈感性, 重复上述过程, 负载电压波形如图10所示。

3) 线路不采用串补装置, 再次重复上述过程, 负载电压波形如图11所示。

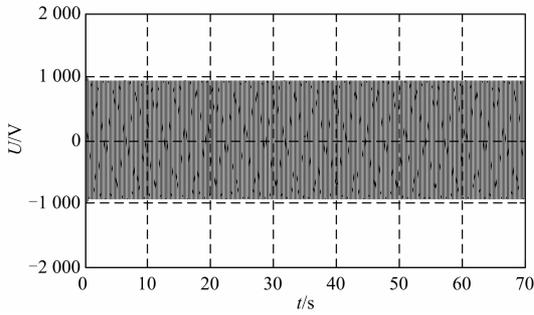


图 10 串联 800 μF 电容时电机定子电压波形
Fig. 10 Voltage waveform of motor stator when series capacitor is 800 μF

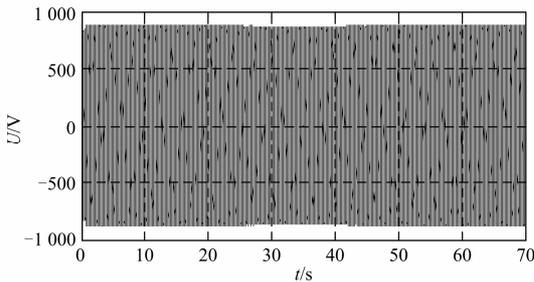


图 11 无串联电容时电机定子电压波形
Fig. 11 Voltage waveform of motor stator when there's no series capacitor

对比三组电压波形可发现如下特点:

1) 采用串补装置且为高度过补偿时, 系统呈容性, 空载起动后, 电压峰值为 1 240 V; 一台电机满载运行时, 电压峰值为 1 160 V; 两台电机满载运行时, 电压峰值为 1 070 V; 全部电机满载运行时, 电压峰值为 940 V。整个过程中, 电压可以在较大的范围内变化, 电压波动剧烈, 只有在最大负荷运行时, 电压才接近额定值 933 V。

2) 采用串补装置且为低度过补偿时, 系统呈感性, 空载起动后, 电压峰值为 945 V; 一台电机满载运行时, 电压峰值为 940 V; 两台电机满载运行时, 电压峰值为 940 V; 全部电机满载运行时, 电压峰值为 940 V。整个过程中, 电压波动非常小, 几乎没有波动, 始终接近额定值 933 V。

3) 不采用串补装置, 空载起动后, 电压峰值为 880 V; 一台电机满载运行时, 电压峰值为 875 V; 两台电机满载运行时, 电压峰值为 872 V; 全部电机满载运行时, 电压峰值为 870 V。整个过程中, 电压波动同样非常小, 但任何时刻电压都低于额定值 933 V。

3.3 合理补偿方式的确定

仿真结果表明, 如果是高度过补偿情况, 电压变化范围较大, 可以在最大负荷时工作于额定状态, 但在负荷较小时, 系统受电端会出现严重的过电压,

应该避免此类现象发生; 如果是低度过补偿情况, 电压波动很小, 而且可以在任意负荷时工作于额定状态; 而不采用串联电容时, 电压波动同样很小, 但负载无法工作于额定状态。经过理论分析和仿真验证, 6 kV 配电线路宜采用低度过补偿方式进行调压, 同时可以减缓电压波动。

4 串补后电动机自激产生的机理及消除

通过上述仿真可以看出, 如果电容器的电容值选择不当, 感应电动机会发生自激现象, 如图 12 所示。

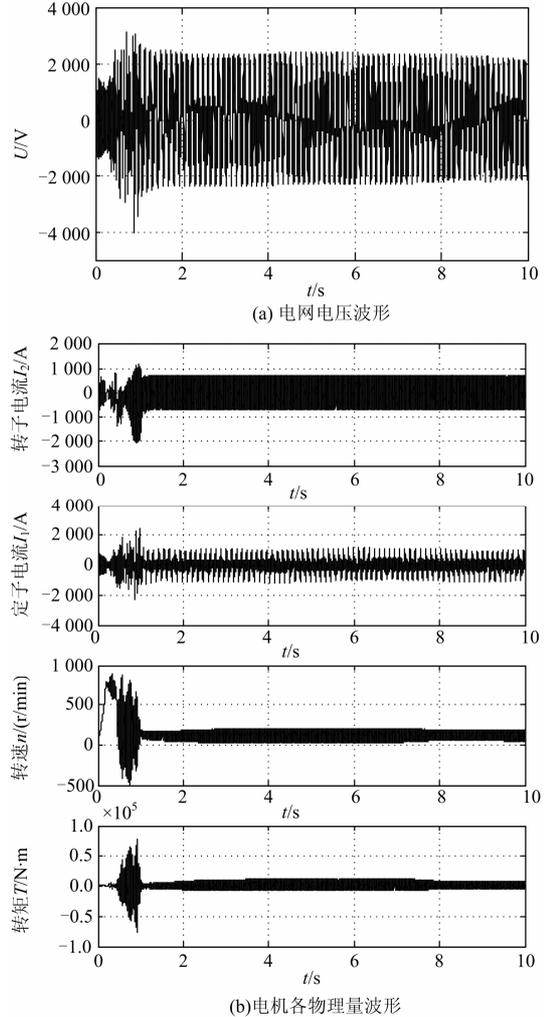


图 12 电机自激引起的变化情况

Fig. 12 Changes caused by self-excitation of motors

为了研究分析自激产生的原因及消除的措施, 可将自激时电动机等效为工频回路和自激回路, 如图 13 所示。

图中, 感应电动机和具有串补装置的电网相联, 感应电动机等值电路中各物理量均采用标幺值, r_1 为定子电阻, r_2' 为转子电阻, $x_{1\sigma}$ 为定子漏抗, $x_{2\sigma}'$

为转子漏抗, x_m 为激磁电抗, s 为转差率, ω_r 为转速, $s=1-\omega_r$, 将其用一个等值阻抗 $Z=r_1+r_{(s)}+jx_{(s)}$ 来表示。

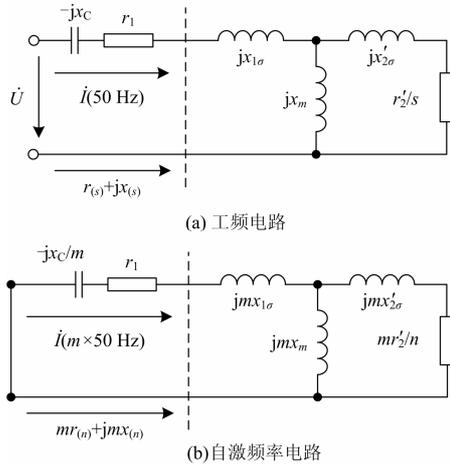


图 13 感应电动机和串联电容相连时的等值电路

Fig. 13 Equivalent circuit of induction motor with series capacitor

在起动过程中, 当感应电动机的转差率为负值时, 其等值电阻 $r_{(s)}$ 为负值, 在这种条件下, 电路的总电阻有可能为零, 构成产生等幅振荡的条件, 并形成感应电动机自激现象。自激时, 定子电流中有两个分量: 一个是由电源决定的基频分量, 一个是由电机和电网参数决定的频率为 $m \times 50$ Hz 的自由分量, 对应地, 在转子回路中, 将有 $s \times 50$ Hz 及 $n \times 50$ Hz 的两个电流分量。 n 为对应 $m \times 50$ Hz 频率的自激电流的转差率, $n=m-\omega_r$ 。感应电动机自激时, 对于基波电流, 其转差率 s 为正; 对于自激电流, 其转差率 n 为负, 由 $\omega_r < 1$ 、 $n < 0$ 可以得到 $m < 1$ 。稳态自激的条件是 $-j\frac{x_c}{m} + r_1 + mr_{(n)} + jmx_{(n)} = 0$, 即 $r_1 = -mr_{(n)}$ 且 $x_c = m^2 x_{(n)}$ 。第一个条件是串联电容器的容抗和电机在 $m \times 50$ Hz 频率时的感抗要相等, 第二个条件是电机定子回路的电阻与负转差率 n 决定的负电阻要相等^[11]。

严格地说, 自激是一种机电参数共振现象, 但当电机的惯性常数较大时, 也可近似地认为是一种电磁参数共振现象。对于图 1 所示的 380 V 配电网中电动机串联电容起动情况, 忽略感应电动机惯性影响时(即认为惯性常数 H 或转动惯量 J 数值很大), 经过理论计算, 临界电容 $C=0.0085$ F, 与试验值 $C=0.011$ F 比较接近, 如果转动惯量扩大 10 倍, 即 $J=23 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 时, 试验值 $C=0.0086$ F, 更加接近于理论计算结果。

电容器的电容值一般都是根据工频电网的要求决定的。而感应电动机产生自激的条件则是由 $m \times 50$

Hz 的电网及电机参数决定的。在满足正常运行的工频电网条件的前提下, 可以破坏在 $m \times 50$ Hz 的电网产生自激的条件来克服电机发生自激现象。因此, 在实际应用中可以采用在电容器两端并联阻抗、在感应电动机机端串联阻抗或待电机起动到正常转速后再投入串补装置等措施来有效消除自激现象。

5 结论

本文针对油田、煤矿的配电网中带有大容量波动性或冲击性负载导致线路末端电机机端电压过低、波动较大的问题, 提出了一种采用串联电容就近对电动机进行补偿的方法, 并利用 Matlab 进行了仿真计算, 对可能引发的自激现象进行了理论分析。将串联电容补偿装置安装在配电变压器高压侧, 即中压等级的配电网中, 并且采用低度过补偿方式, 可以在避免感应电动机自激的情况下, 在较大的范围内提升线路末端电压, 消除由于波动性负荷引起的电压波动, 从而为配电网中改善电动机的运行性能和机端电压质量提供了一条新的思路。

参考文献

- [1] 许丹, 唐巍. 基于区域可达性分析的复杂配电网可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 172-178.
XU Dan, TANG Wei. Reliability evaluation of complex distribution networks based on regional accessibility analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(6): 172-178.
- [2] 刘殿勤. 串联电容补偿技术在 6(10) kV 供电线路上的应用[J]. 煤矿自动化, 1997(1): 37-41.
LIU Dianqin. The application of series capacitance compensation technology in 6 (10) kV power lines[J]. Industry and Mine Automation, 1997(1): 37-41.
- [3] 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.
- [4] 吴勇海, 蔡金锭. 中压配电网串联电容补偿调压技术研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(13): 140-144.
WU Yonghai, CAI Jinding. Study and application of voltage regulation technology by series capacitance compensation in medium voltage distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(13): 140-144.

- [5] 戴小庞, 海晓涛, 柏峰. 可控串联电容补偿在配电网电压优化中的应用[J]. 陕西电力, 2011, 39(10): 69-72.
DAI Xiaopang, HAI Xiaotao, BAI Feng. Application of thyristor controlled series compensation in voltage optimization for distribution power system[J]. Shaanxi Electric Power, 2011, 39(10): 69-72.
- [6] 费希有, 祁歌. 6 kV 配电线路的串联电容补偿[J]. 重庆电力高等专科学校学报, 1999, 4(4): 1-6.
FEI Xiyu, QI Ge. The compensation condenser of 6 kV distribution[J]. Journal of Chongqing Electric Power College, 1999, 4(4): 1-6.
- [7] 张先泰, 蔡金锭, 丁智华, 等. 电容补偿在配电网电压调节中的应用[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(2): 116-118.
ZHANG Xiantai, CAI Jinding, DING Zhihua, et al. Application of capacitance compensation in voltage adjustment of distribution power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(2): 116-118.
- [8] 张定华, 王卫安, 刘华东, 等. 直挂式高压配网电能质量一体化治理技术及其应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(7): 243-251.
ZHANG Dinghua, WANG Weian, LIU Huadong, et al. Suspended integrated power quality compensation technology in high voltage distribution networks and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(7): 243-251.
- [9] 浙江省电力中心试验所高压实验组, 浙江大学发电教研组. 串联电容补偿装置在电力系统中的应用[M]. 北京: 水利水电出版社, 1977: 1-128.
- [10] 李良威, 邓云川, 严希. 牵引供电系统用移动式串联电容补偿方案探讨[J]. 电气化铁道, 2013(5): 42-44.
LI Liangwei, DENG Yunchuan, YAN Xi. The mobile series capacitor compensation program in traction power supply system[J]. Electric Railway, 2013(5): 42-44.
- [11] 清华大学电力工程系, 南昌有色冶金设计院, 山西省电力局. 串联电容引起的电动机自激[M]. 北京: 科学出版社, 1978: 1-103.
- [12] 索南加乐, 吴双惠, 侯卓, 等. 串补线路故障特征分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(13): 38-42.
SUONAN Jiale, WU Shuanghui, HOU Zhuo, et al. Fault characteristics analysis for series compensated line[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(13): 38-42.
- [13] 杨英. 输电线路串联电容器补偿研究[J]. 企业技术开发, 2013, 32(3): 108-109.
YANG Ying. The research of series capacitance compensation in transmission lines[J]. Technological Development of Enterprise, 2013, 32(3): 108-109.
- [14] 刘家军, 闫泊, 姚李孝, 等. 平行双回线中串补电容对零序电抗型距离保护的影响[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 264-270.
LIU Jiajun, YAN Bo, YAO Lixiao, et al. Influence of series compensation capacitor on zero-sequence reactance-type distance protection in parallel double-circuit lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 264-270.

收稿日期: 2014-07-08; 修回日期: 2014-08-04

作者简介:

周 封(1970-), 男, 博士, 教授, 研究方向为大型电机综合物理场计算、工业设备节能控制与故障监测、新能源发电及监测控制等; E-mail: f.zhou@163.com

肖 强(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网自动化。

(编辑 葛艳娜)