

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.11.009

配电网串联补偿装置稳态和暂态特性研究

冯南战¹, 张金凤², 郭 洁²

(1. 陕西省电力公司, 西安 710048; 2. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要: 电容串联补偿技术应用于配电网可以实现对线路无功正补偿、无时延、有效改善线路沿线电压质量, 与传统的补偿技术和调压技术相比, 具有负荷自适应性和良好的操作性。但由于配电网的复杂性和差异性, 要实现电容串联补偿的合理配置必须掌握串联补偿装置(以下简称串补)稳态与暂态特性, 补偿容量和最佳安装位置以及不同因素的影响规律。文中应用EMTP电磁暂态程序建立了典型辐射式结构的10 kV配网串补仿真模型, 对输电导线直径、负荷容量及功率因素、串补容量及安装位置等对沿线路电压分布的影响进行了全面仿真分析, 研究了三相短路故障时串补装置内部的电磁暂态过程, 给出了旁路断路器动作时间与金属氧化物限压器(MOV)配合参数、吸收容量的关系。

关键词: 串联补偿; 数值仿真; 电磁暂态; MOV; 配电线路

Research on Steady and Transient Characteristic of Series Compensation Device in Distribution Network

FENG Nanzhan¹, ZHANG Jinfeng², GUO Jie²

(1. Shaanxi Provincial Electric Power Company, Xi'an 710048, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Application of series capacitor compensation used in distribution line can bring about positive and no-time-lag reactive compensation, and can improve the voltage quality of the line. It is load-adaptive and has the good operability. Because of the complexity and otherness of distribution lines, it is needed to know well the steady and transient characteristics, capacity, position, influencing factors about the series capacitor compensation to achieve the good result. This paper establishes a typical model of the series capacitor compensation for 10 kV radial distribution line using EMTP, and makes systematic effective analyzes such as wire diameter, load-capacity and $\cos\varphi$, capacity and position to the voltage along the line. It gives the transient process results in the inside of compensation device under 3 phase breakdown, and the relationship between close-time of bypass circuit breaker and absorption capacity of MOV.

Key words: series compensation; numerical analysis; electromagnetic transient; MOV; distribution line

0 引言

串补对于长距离、大负荷、低功率因素和大电压闪变的配电线路的低电压治理具有技术上的先进性, 在提高相同电压水平时需要的无功容量仅为并联补偿的 25% 左右, 并具有无时滞正向补偿无功功率的特性, 近年来在配电网低电压治理中得到越来越广泛的应用^[1-3]。

有串补装置接入时沿输电线路电压降落见式(1)

$$\Delta U = \frac{PR + Q(X_L - X_C)}{U_2} + j \frac{P(X_L - X_C) - Q_R}{U_2} \quad (1)$$

式(1)中: P 、 Q 为线路末端负荷的有功和无功功率; U_2 为线路末端电压; R 、 X_L 为线路电阻及电抗; X_C 为串补电容容抗。从式(1)可以看出, 串补效果(以沿输电线路电压降落表征) 受到多因素的影响, 例如, 输电线路导线直径、负荷容量、负荷分布及功率因素、串补装置容量及安装位置等, 要取得理想的补偿效果, 必须对上述影响因素进行全面和系统的分析^[4]。文中应用 EMTP 对上述每一个因素的影响进行逐一仿真计算, 研究分析每一个因素对电压分布的影响程度和规律。

1 稳态运行特性计算分析

1.1 不同型号架空导线对沿线电压分布的影响

配电网中使用的架空线有多种型号,常见的有 LGJ-50~LGJ-240。不同型号架空导线的单位长度交流电阻和电感值见表 1。

由表 1 可以看出,不同型号导线单位长度电感差异较小,但单位长度电阻值相差很大甚至高达几倍。以如下典型线路结构(见图 1)和参数为基础计算

表 1 典型架空导线电阻、电感

Table 1 Resistance and inductance of typical wire

导线型号	单位长度电感 / (mH·km ⁻¹)	单位长度电阻 / (Ω·km ⁻¹)
LGJ-240	0.921	0.130
LGJ-150	0.970	0.211
LGJ-120	0.989	0.255
LGJ-70	1.049	0.432
LGJ-50	1.084	0.609

不同导线对沿线路电压分布的影响。

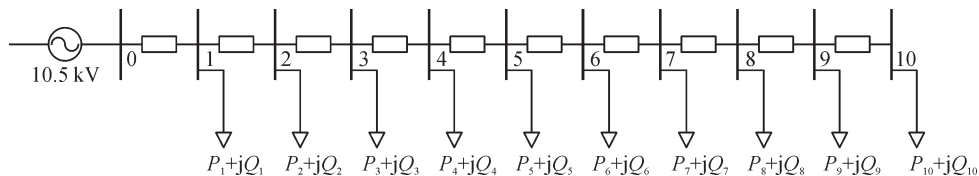


图 1 典型计算接线图

Fig. 1 Typical simulation diagram

计算条件:线路长度 15 km,负荷 5 MVA(功率因数 0.9),负荷沿线路均匀分布,串补安装于线路中间位置(7.5 km),导线型号分别为 LGJ-70、GJ-120、LGJ-240 时电压沿线路分布的计算结果见图 2。

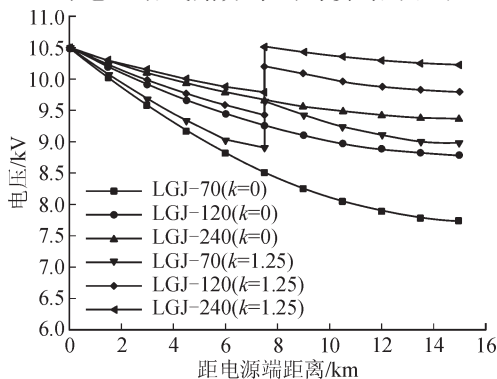


图 2 不同型号导线的沿线电压分布

Fig. 2 Voltage along line with different wires

从图 2 可以看出,对应 3 种不同的导线,当在线路中间位置安装相同补偿度($k=1.25$)的串补装置后,3 种型号导线在串补后的沿线电压均获得提高,体现出串补提高线路电压的作用。但小直径的导线电压升高不明显,大直径的导线串补电压提升比率较高,究其原因,导线越细,线路阻抗中电阻所占比例越重,感抗所占比例越轻,此时,沿线电压降更多的是由线路电阻导致的,而串补主要是以抵消感抗来补偿和减小压降。例如 LGJ-50 导线,其单位长度的交流电阻和感抗分别为 0.609、0.339 Ω,电阻比感抗大接近一倍,此时线路电压降落主要由导线电阻引起。LGJ-50 导线与 LGJ-240 导线在相同位置(线路中间位置)相同补偿度($k=1.25$)下补偿效果的计算结果见图 3,图 3 中两条水平线为电压合格的上下限值。从图 3 可以看出,由于小直径导线线径过细,

其电阻产生的压降使线路电压降落严重,即使采用相同补偿度的串补,其沿线电压绝大多数仍处于电压合格下限以下,很难提高到合格水平,表明对小直径的导线串补补偿效果较差。

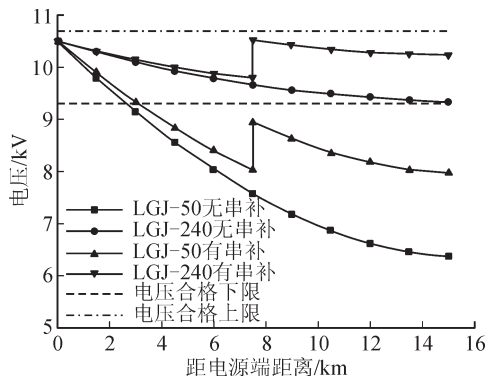


图 3 LGJ-50 与 LGJ-240 的补偿效果

Fig. 3 Compensation result of LGJ-50 and LGJ-240

1.2 不同负荷功率因数对沿线电压分布的影响

计算条件:线路长度 15 km,负荷 5 MVA,负荷沿线路均匀分布,导线型号: LGJ-120,串补安装于线路 1/3 位置(4.5 km),补偿度 $k=1.25$ 。计算功率因数 $\cos\varphi$ 分别为 0.85、0.9、0.95 时电压沿线路的分布,见图 4(均匀分布)。

由图 4 可以看到,当 $\cos\varphi$ 分别为 0.95、0.9、0.85 时,未安装串补线路末端负荷节点电压分别为 9.00、8.89、8.83 kV,安装串补后,补偿点电压分别提升 0.70、1.00、1.21 kV;功率因数越低,线路流过的感性电流分量越大,电压沿线路降落越大。还可以看出,串补电容不仅补偿线路感抗,也能补偿一部分负荷感抗,因此串补特别适合应用于负荷功率因数较低的线路,其补偿效果更加明显。

1.3 不同负荷大小对沿线电压分布的影响

计算条件:线路长度 15 km,负荷沿线路均匀分

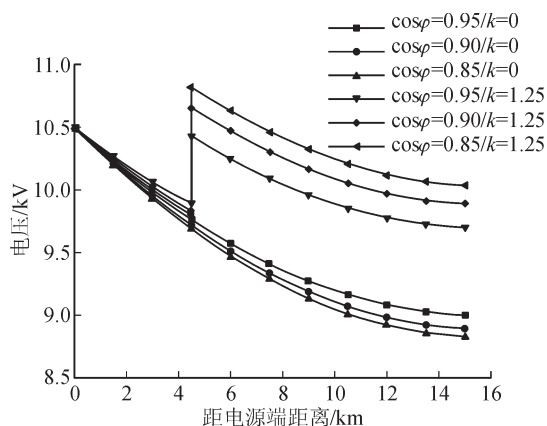


图4 不同负荷功率因数沿线电压分布

Fig. 4 Voltage along line with different $\cos\varphi$

布,导线型号 LGJ-120,串补安装于线路 1/3 位置 (4.5 km),补偿度 $k=1.25$,计算负荷分别为 3、5、7 MVA($\cos\varphi=0.9$)时电压沿线分布见图 5。

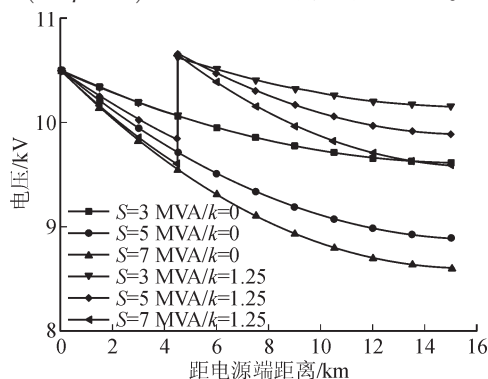


图5 不同负荷大小对沿线电压分布的影响

Fig. 5 Voltage along line with different load capacity

从图 5 可以看出,负荷为 3、5、7 MVA 时,未安装串补时线路末端电压分别为 9.57、8.89、8.19 kV,安装串补后,电压分别提升 0.33、1.00、1.36 kV;随着负荷增大,虽然线路末端的电压有一定程度的下降,但补偿电压也随电流增大倍数同步提高,减缓了负荷增大导致的沿线电压降落的增大;小负荷下,线路电流小,式(1)中 P 、 Q 小,电压改善作用也小。仿真结果很好地说明了串补的无功补偿正向跟随性(负荷自适应性),根据公式可知,串补的电压提升量与线路流过的电流成正比,即负荷越重补偿效果越好,这就是串补的负荷自适应性,也是其他无功补偿技术均不具备的特性。例如并联补偿,其补偿容量与电压平方成正比,负荷越重时电压降落越严重、末端电压越低,补偿效果也越差^[4]。

1.4 串补补偿度对沿线电压分布的影响

计算条件:线路长度 15 km,负荷 5 MVA, $\cos\varphi=0.9$,负荷沿线路均匀分布,导线型号 LGJ-120,串补安装于线路 1/3 位置(4.5 km),计算补偿度 k 分别为 0.9、1.1、2.25 时的沿线电压分布见图 6。

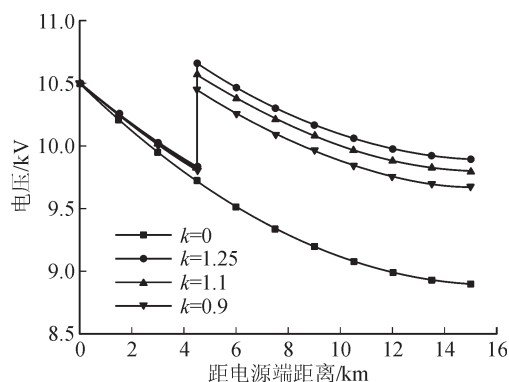


图6 不同补偿量对沿线电压分布的影响

Fig. 6 Voltage along line with different compensation capacity

从图 6 可以看出,补偿度不同,电压提升数值也不同,补偿度为 0.9、1.1、1.25,补偿点电压分别提升 0.91、0.92、0.94 kV。无论补偿度 k 大小,加串补后串补节点以后电压下降速度与无串补时一致,但因安装点的电压得到提升,使得安装点以后各节点的电压均得到相同比例的提高。

1.5 串补安装位置对沿线电压分布的影响

计算条件:线路长度 15 km,负荷 5 MVA, $\cos\varphi=0.9$,负荷沿线路均匀分布,导线型号 LGJ-120,补偿度 $k=1.25$,计算安装位置 0、4.5、7.5 km 时沿线电压分布见图 7。

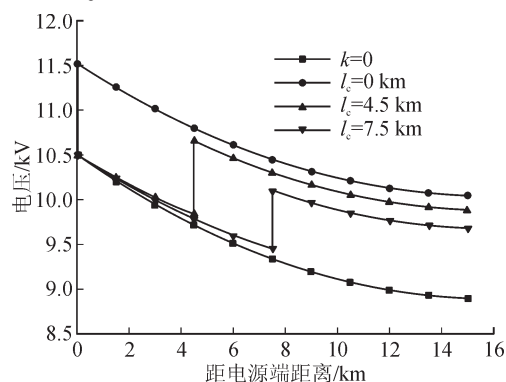


图7 串补安装位置对沿线电压分布的影响

Fig. 7 Voltage along line with different device position

从图 7 可以看出,随着串补安装位置向线路后端移动,串补带来的电压提升幅度降低,这是因为对于负荷沿线路均匀分布的情况,沿线电流从首端向后逐渐减小,串补电容流过的电流也逐渐减小,电压提升作用降低,补偿效果减弱。

1.6 串补装置安装位置的优化

如上所述,影响配电线路沿线电压分布的因素很多,而配电线路无论是导线型号大小、负荷大小、负荷功率因数以及负荷分布位置均千变万化,变量很多,但对于一条具体的配电线路,上述所有变化量都是确定的,因而研究串补最优位置,主要是通

过仿真计算确定在全线电压提升满足电压合格率要求的前提下,确定串补的最优容量和位置。

以一个典型配网线路结构作为算例说明。

线路长度:15 km, 导线型号: 前段 7.5 km 为 LGJ-150, 中间 4.5 km 为 LGJ-95, 后段 3 km 为 LGJ-70; 负荷总量:5 MVA($\cos\varphi=0.9$); 负荷分布: 前 7.5 km 均匀分布 3 MVA, 中间 4.5 km 分布 1 MVA, 最后 3 km 分布 1 MVA。无串补时沿线电压分布的计算结果见图 8。

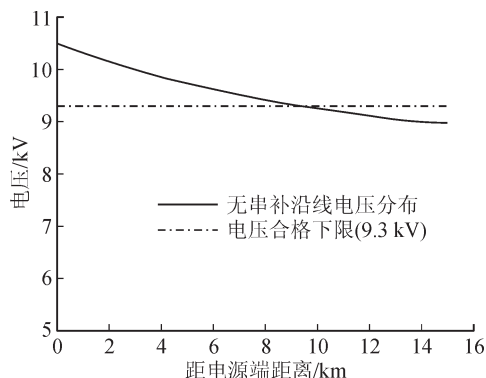


图 8 无串补沿线电压分布

Fig. 8 Voltage along line, no compensation device

由图 8 可以看到,无串补时,距离出线端 9 km 及其以后的电压均低于 9.3 kV,不满足电压合格率要求,线路末端电压 8.98 kV。

分别计算 k 为 0.9、1.5、2.0 三个串补度下,在电压降落 1/2 处对应位置(位置 1)和电压下限对应的位置(位置 2)安装串补后沿线路电压分布,结果见图 9。

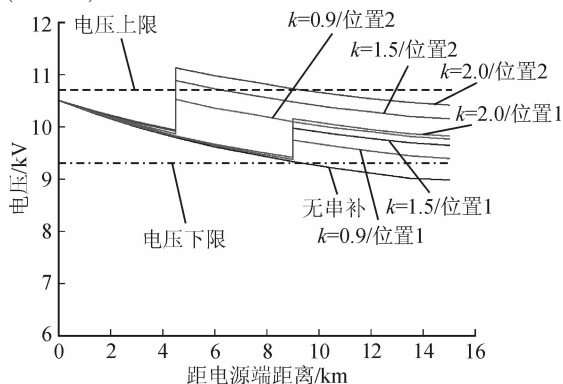


图 9 有串补沿线电压分布

Fig. 9 Voltage along line, have compensation device

从图 9 可以看到:相同的串补度下,位置 1 的电压提升量达到 1.04 kV,位置 2 为 0.73 kV,位置 1 的电压提升作用大于位置 2;位置 1 在 $k=1.5$ 和 $k=2.0$ 两个补偿度下,安装点以及沿线多点的电压均超过电压合格上限,位置 2 三个补偿度下沿线电压均在合格范围内;从沿线所有点电压最接近 10 kV 额定电压的角度,位置 1 当 $k=0.9$ 时沿线电压的分布最理想;如果从即经济同时又能最大化地满足沿线电

压合格的要求出发,也可以采用位置 2, $k=2.0$ 的补偿方案,因为电容器的造价与其额定电压平方成正比,串补位置靠后,流过电容器的电流减小,电容器的额定电压减小,有一定的经济效益,同时位置靠后时,发生短路故障对串补装置的冲击也比位置 1 更小,会获得更好的安全效益。

根据仿真计算的结果,可以得出串补位置优化的原则如下:

1)串补接入后,应使沿线电压均在合格范围,或者尽可能接近电压合格范围(有时电压降低过大无法仅靠一套串补装置使沿线电压都达到合格),特别要核对串补安装点负荷侧的电压不能高于电压合格率的要求;

2)对于具体线路,串补的安装位置与采用的串补度直接相关,一般情况下应使串补接入后沿线各点电压最接近线路的额定电压(10 kV),应在补偿度和安装位置的不同搭配中进行优选以达到上述目标;

3)根据以往的研究,一般串补装置应安装在线路总电压跌落的 1/2 处附近,但对于负荷沿线路分布特殊的情况,则应根据仿真计算的结果优化位置,例如当负荷主要集中在线路末端时,串补装置也应在满足电压合格的前提下尽可能向后靠近负荷安装;再例如,当沿线电压降落较大时,电压跌落 1/2 处的电压可能已经低于电压合格率的要求,在此位置安装串补装置则串补前已有电压不合格的点,此时串补的安装位置应适当靠前;

4)当线路电压降落较小时,采用欠补偿可以满足电压提升要求时,应优先考虑采用欠补偿,当欠补偿无法满足电压合格率要求时,可以采用过补偿,但过补偿必须控制补偿度,补偿度不能过高,否则,在不利的运行条件下容易发生谐振,通常补偿度不超过 2.5;

5)在满足电压合格的前提下,应对不同的位置和补偿度方案进行经济性评估,以确定技术经济最优方案;

6)当一套串补装置无法解决线路低电压问题时,可以采用多套串补或者串补与其他调压装置(例如调压器等)配合使用的解决方案。

2 暂态运行特性计算分析

运行中,当系统出现暂态过程时,暂态电磁波也会波及到串补装置。通常对于 10 kV 辐射式线路的串补装置,影响最大的是负荷侧节点发生三相短路故障,此时会在串补装置内部发生强烈的电磁暂态过程^[5]。快速开关型串补装置系统接线图见图 10。

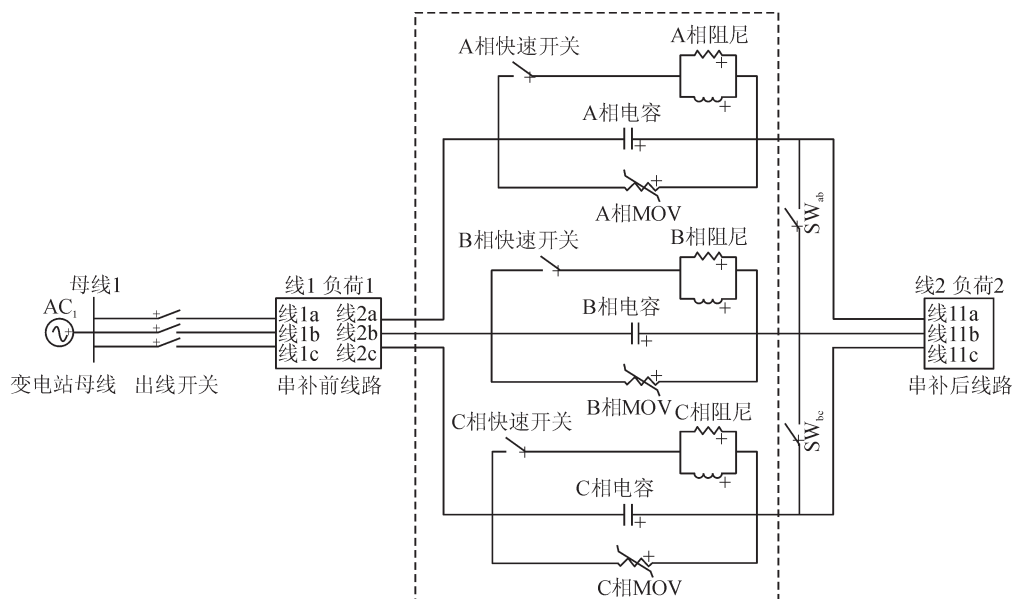


图 10 快速开关型串补装置系统接线图

Fig. 10 System diagram of compensation device

当串补装置负荷侧出线处发生三相短路时,短路电流会在串补电容器两端产生极高的暂态过电压,如果不加以保护,会造成电容器击穿损坏。而作为保护的 MOV 以及快速开关在暂态过程中会经受较大的冲击^[6-7]。以下计算均以此为基础。

仿真的基本参数:线路长度 15 km,导线 LGJ-120,总负荷 5 MVA($\cos\varphi=0.9$)沿线均匀分布,串补安装于线路中间(7.5 km),串补度 $k=1.25$,MOV 伏—安特性见图 11。

线路发生三相短路时,串补装置内电磁暂态仿真波形见图 12。从图 12 中可以看到,当三相短路发生时,串补电容器两端的电压迅速升高,当达到 MOV 动作电压时得到保护,电压被限制在 6 kV 左

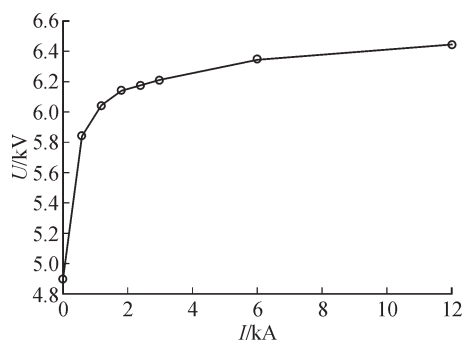


图 11 MOV 伏安特性曲线

Fig. 11 V-A characteristic of MOV

右 (电容器的耐受电压为 8 kV),10 ms 后快速开关合闸,将 MOV 和电容器旁路,经过约 22 ms 的振荡电压迅速衰减为接近零。

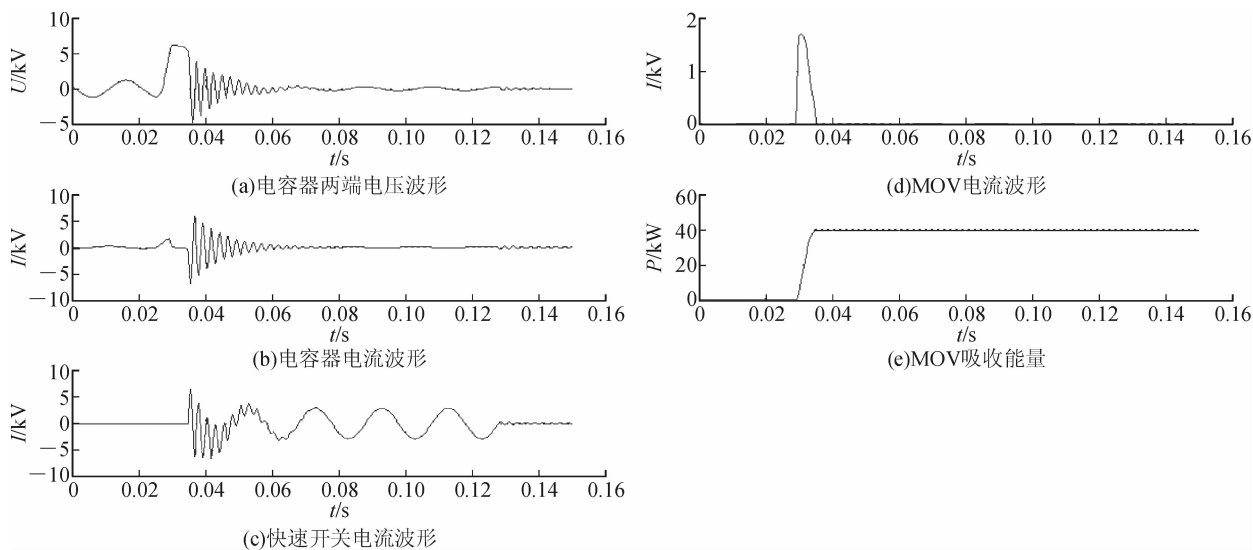
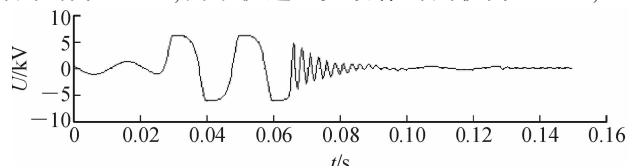
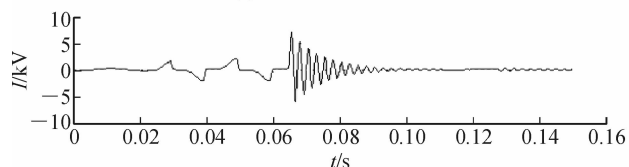
图 12 三相短路时串补装置内电磁暂态仿真波形(合闸 $t=10$ ms)

Fig. 12 Transient waveforms in device under 3 phase breakdown(close time=10 ms)

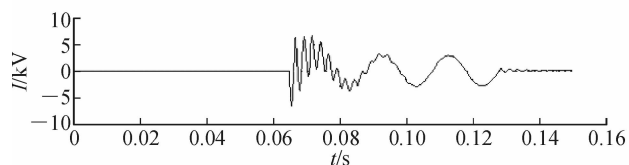
电容器流过的最大电流超过 6.8 kA, 经 22 ms 后衰减为很低的值; 快速开关流过的电流峰值达到 6.5 kA, 关合后经过 22 ms 的振荡, 稳定在 2.8 kA(峰值)的短路电流水平, 当 125 ms 出线开关动作后, 切除短路时下降为零。MOV 的电流峰值为 1.7 kA, 导通时间约为 10 ms, 由于快速开关动作时间仅为 10 ms,



(a) 电容器两端电压波形



(b) 电容器电流波形

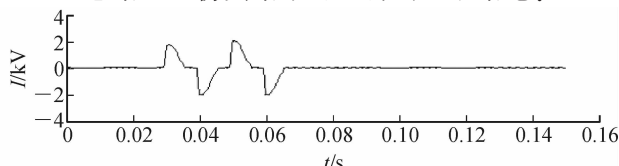


(c) 快速开关电流波形

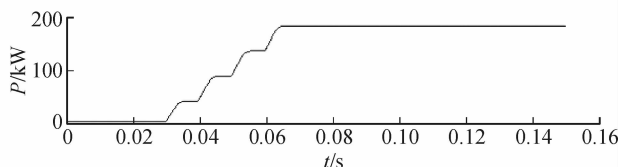
MOV 吸收的能量为 40 kJ。

相同接线但开关动作时间 40 ms 时暂态仿真结果(考虑快速开关拒动后备开关动作)见图 13, 此时 MOV 中流过了 4 个几乎完整的动作电流波, 吸收的能量达到 182 kJ。

总结以上仿真结果可以得出以下结论:



(d) MOV 电流波形



(e) MOV 吸收能量

图 13 三相短路时串补装置内电磁暂态仿真波形(合闸 $t=40$ ms)

Fig. 13 Transient waveforms in device under 3 phase breakdown(close time=40 ms)

1) MOV+快速开关可以很好地保护串补电容器免遭短路故障引起的过电压击穿, 当 MOV 的伏—安特性与电容器的耐受电压选择适当的匹配系数时, 电容器可以得到有效保护;

2) 快速开关关合的暂态过程中, 峰值电流一般为数千安培, 对于开关的关合没有困难, 因此对快速开关没有特殊的关合电流的要求;

3) 快速开关动作时间的长短直接决定了 MOV 吸收能量的大小, 短的关合时间可以显著减小 MOV 吸收的能量, 不但具有显著的经济性, 同时提高了 MOV 的安全性;

4) MOV 流过电流的时间与普通避雷器相比长出许多, 特别是在考虑快速开关拒动后备开关动作的情况下, MOV 的导通时间达到数十毫秒甚至上百毫秒, MOV 的吸收容量很大, 必须采用多柱并联结构才能达到要求。

3 结论

1) 影响串补装置补偿效果的因素较多, 输电导线线径、负荷容量、负荷分布和功率因素、串补安装位置以及容量等是主要影响因素, 通过稳态仿真可以获得每一因素的影响规律, 为串补的合理设计奠定基础;

2) 对于具体的配电线路, 串补装置设计的重点是容量的确定和安装位置的优化, 设计原则应最大化地使沿线电压均在合格范围, 或者尽可能接近电压合格范围, 串补接入后沿线各点电压最接近线路的额定电压。应对不同方案进行技术经济性评估, 以确定技术经济最优方案;

3) 当安装串补的配电线路发生相间短路故障时, 串补装置内部会出现电磁暂态过程, 通常情况下串补负荷侧出口三相短路最为严重, 一般要求有比常规断路器更快的合闸时间以保护电容器和 MOV 的安全, 断路器合闸时间和 MOV 容量的匹配是决定串补装置暂态安全性和经济性的主要因素, 必须通过详细的暂态仿真加以确定。

参考文献:

- [1] ANDERSON P M, FAMER R G. 电力系统串联补偿[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
ANDERSON P M, FAMER R G. Series compensation of power systems[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- [2] 朱 跃, 周 越, 张金凤. 快速开关型串联补偿装置中 MOV 容量的确定[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(6): 7-10.
ZHU Yue, ZHOU Yue, ZHANG Jinfeng. Capacity determination of MOV for the 10 kV highspeed-switchgear-type

(下转第 62 页)

- of multi-feed-in HVDC system[C]//Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). [S.l.]:IEEE, 2010:1-4.
- [16] 李洪兴. 变论域自适应模糊控制器[J]. 中国科学:E 辑, 1999,29(1):32-42.
- LI Hongxing. Adaptive fuzzy controllers based on variable universe[J]. Science in China:E Series, 1999,29(1):32-42.
- [17] 李洪兴. 模糊控制的插值机理[J]. 中国科学:E 辑:技术科学,1998,28(3):259-267.
- LI Hongxing. Interpolation mechanism of fuzzy control[J]. Science in China:E Series, 1998,28(3):259-267.
- [18] 邵 诚,董希文,王晓芳. 变论域模糊控制器伸缩因子的选择方法[J]. 信息与控制,2010,39(5):536-541.
- SHAO Cheng, DONG Xiwen, WANG Xiaofang. Selection method of the contraction-expansion factor of variable universe fuzzy controller[J]. Information and Control, 2010, 39(5):536-541.
- [19] 张卫东. 变论域模糊控制器改进设计及其仿真[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- ZHANG Weidong. The improved design and simulation of the variable universe fuzzy controller[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2012.
- [20] 张吉礼;欧进萍;于达仁. 基于相平面轨迹特征的规则自调整模糊控制方法[J]. 控制理论与应用,2003,20(4):607-611.
- ZHANG Jili, OU Jinping, YU Daren. Method of rule self-tuning fuzzy control based on trajectory performance of phase plane[J]. Control Theory & Applications, 2003,20(4):607-611.
- 胡松伶(1991—),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统稳定与控制。
- 王渝红(1971—),女,教授,硕士生导师,IEEE 会员,主要研究方向为电力系统稳定与控制(通讯作者)。

(上接第 56 页)

- series capacitor compensation[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2016,32(6):7-10.
- [3] 梁一桥,吕佳铭,饶崇林,等. 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(2):220-225.
- LIANG Yiqiao, LYU Jiaming, RAO Chonglin, et al. An intelligent fixed series capacitor compensation device for 10 kV distribution network and its engineering application[J]. Power System Technology, 2014,38(2):220-225.
- [4] 张金凤. 10 kV 配电网串联电容补偿特性研究[D]. 西安:西安交通大学,2017.
- ZHANG Jinfeng. Research on compensation characteristics of series compensation capacitor of 10 kV distribution network[D]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University, 2017.
- [5] DL/T 1156—2012 串联补偿装置用金属氧化物限压器[S]. 北京:国家能源局,2012.
- DL/T 1156—2012 Metal-oxide varistors for series capacitor banks[S]. Beijing:National Energy Administration, 2012.
- [6] IEC 33 144—1992 Protective equipment for series capacitor banks[S]. 1992.
- [7] 赵冬一,汤 霖,胡淑慧,等. 串联补偿装置用 MOV 工况分析及其关键技术的研究[J]. 高压电器,2014,50(6):111-116.
- ZHAO Dongyi, TANG Lin, HU Shuhui, et al. Operating condition analysis of metal-oxide varistor for series capacitor bank and its key technologies[J]. High Voltage Apparatus, 2014,50(6):111-116.
- 冯南战(1965—),男,高级工程师,研究方向为过电压数值仿真、电力系统运行维护。