

# 风电场 35 kV 电缆网络中性点接地方式研究

刘渝根<sup>1</sup>, 许晓艳<sup>1</sup>, 马晋佩<sup>1</sup>, 谢丽娜<sup>2</sup>

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 国网重庆市电力公司, 重庆 402284)

**摘要:** 为研究风电场 35 kV 电缆网络中性点接地方式的适用性和可行性, 针对电缆网络较大的对地电容电流水平, 利用 Matlab/Simulink 软件建模仿真。给出了以贵州龙里风电场为工程背景、不同中性点接地方式下的运行特性, 并提出了一种改进的、适合风电场 35 kV 电缆网络的中性点复合运行方式。复合方式以消弧线圈为基础, 当接地电容电流水平小于 100 A 而发生单相接地故障时, 先并中值电阻抑制系统暂态过电压, 若为瞬时性故障, 消弧线圈补偿后故障自动消除, 若为非瞬时性故障则利用短时并入小电阻启动零序电流保护。而当接地电容电流水平大于 100 A, 发生单相非瞬时性接地故障时, 直接利用小电阻的短时投入, 启动零序电流保护装置快速切除故障。仿真结果表明, 复合方式适应性强, 且相关设备可按照相关绝缘水平进行选取, 具有较高的可操作性。

**关键词:** 风电场; 电缆网络; 中性点; 电容电流; Matlab/Simulink

## Study on neutral grounding modes of 35 kV cable networks in wind farm

LIU Yugen<sup>1</sup>, XU Xiaoyan<sup>1</sup>, MA Jinpei<sup>1</sup>, XIE Lina<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Chongqing Electric Power Corporation, Chongqing 402284, China)

**Abstract:** To study the applicability and feasibility of wind farm 35 kV cable networks neutral grounding methods, and aiming at larger capacitive current to ground level in cable networks, the simulation is made by using MATLAB/Simulink software. This paper takes Long-li wind farm as engineering background and gives operational characteristics under different neutral grounding ways. A modified operation mode based on arc suppression coil is proposed for wind farm 35 kV cable networks. When single-phase grounding fault occurs and the grounding capacitive current is less than 100 A, the medium resistance is switched to suppress the transient over-voltage in the initial period of the fault, the transient grounding fault can be extinguished by compensating arc suppression coil while non-transient grounding fault can be solved through zero sequence current protection. For the case of grounding capacitive current greater than 100 A, the zero sequence current protection device is started by inputting a low resistance to remove non-transient grounding fault timely. Simulation results show that the improved method is adaptable and the related equipment can be selected in accordance with the relevant insulation levels, which has a high operability.

**Key words:** wind farm; cable networks; neutral point; capacitive current; Matlab/Simulink

中图分类号: TM726 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)13-0092-08

## 0 引言

随着电缆线路的推广和普及, 对场址环境要求颇高的风电场也倾向于采用电缆线路, 而电缆网络较大的对地电容电流, 使得与电缆线路故障和电力系统安全关系紧密的电缆网络中性点接地方式倍受关注。近年来, 上海的电缆网络在国内最具代表性, 其电压等级多, 投运时间长。尤其上海市中心的

35 kV 电缆网络, 曾采用消弧线圈带 10 Ω 的并联电阻, 并经 10 s 延时投入以选择故障线路, 继之又在苏联专家的建议下, 拆除并联电阻运行。后来随着电缆线路的延长, 又重新开始使用 9.9 Ω 的低电阻接地方式。

区别于传统城市配网<sup>[1-2]</sup>, 风电场的负荷为风机, 而城市配网直接面向用户, 其通常采用中性点经消弧线圈接地并配合小电流选线装置, 但因小电流选线装置一般需要一定的判断时间, 然后才跳闸动作, 这对于风电场而言存在着很大的安全隐患,

且很少有参考文献深入分析这种差异性及其适用性。鉴于此, 借助目前贵州龙里风电场三期(大坪子风场)和四期(马郎坡风场)工程中的典型 35 kV 电缆网络中性点经小电阻( $R_d=47 \Omega$ )接地方式为研究背景<sup>[3-4]</sup>, 利用 Matlab/Simulink 软件平台, 结合实际工程运行经验, 分析 35 kV 电缆网络在不同因素作用不同接地故障下的运行特性, 进而提出改进的中性点接地方式, 并验证分析其可行性。

## 1 风电场建模

在明确风电场电气系统与常规能源电气系统的区别下, 建立适当的风电场数学模型<sup>[5-7]</sup>。先简单介绍龙里风电场三、四期工程的现状, 再针对风电场特有的风力发电机建模, 并结合风电场的工作条件, 对整个风电场进行建模。

### 1.1 龙里风电场简介

大坪子风场、马郎坡风场位于贵州省黔南市辖区内龙里县的草原乡和民主乡, 总装机容量 96 MW, 48 台单机容量为 2 MW 的风机构成。风机出口电压 690 V, 并采用两级升压, 即 0.69/35 kV 集电变和 35/110 kV 主变。集电变高压侧使用联合单元接线, 8 台风机构成一联合单元, 经 6 回 YJV22-185 的集电电缆(交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套钢带铠装)线路接入升压站 35 kV 低压侧, 该电缆网络系统目前主要采用中性点经小电阻( $R_d=47 \Omega$ )接地方式, 再经一回 LGJ-240 架空线接入马郎变电站。

### 1.2 风力发电机模型

风力发电机模型一般包含风速、风力机及发电机组模型<sup>[8-10]</sup>。

其中, 风速是一个在空间和时间上典型的随机变量, 即  $v=f(x, y, z, t)$ 。为此进行了简化处理, 沿用普遍采用的四分量模型: 基本风  $V_{WB}$ 、阵风  $V_{WG}$ 、渐变风  $V_{WR}$  和随机风  $V_{WN}$  的叠加, 即

$$V = V_{WB} + V_{WG} + V_{WR} + V_{WN} \quad (1)$$

(1) 基本风  $V_{WB}$ , 用风电场测风数据的威尔分布参数(尺度参数  $A$  和形状参数  $K$ )近似有

$$V_{WB} = (1+1/K)A\Gamma \quad (2)$$

式中,  $\Gamma(\cdot)$  为伽马函数。

(2) 阵风  $V_{WG}$  描述为

$$\begin{cases} V_{WG} = \begin{cases} 0 & (t < T_{IG}) \\ V_s & (T_{IG} \leq t \leq T_{IG} + T_G) \\ 0 & (t > T_{IG} + T_G) \end{cases} \\ V_s = \frac{G_{\max}}{2} [1 - \cos(2\pi t / T_G - T_{IG} / T_G)] \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $V_s$ 、 $T_{IG}$ 、 $T_G$  及  $G_{\max}$  依次表示阵风风速、起动时间、周期及最大值。

(3) 渐变风  $V_{WR}$  描述为

$$\begin{cases} V_{WR} = \begin{cases} 0 & (t < T_{1R}) \\ V_r & (T_{1R} \leq t \leq T_{2R} + T_G) \\ R_{\max} & (T_{2R} \leq t \leq T_r + T_{2R}) \\ 0 & (t > T_r + T_{2R}) \end{cases} \\ V_r = R_{\max} [1 - (t / T_{1R}) / (T_{1R} - T_{2R})] \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $R_{\max}$ 、 $T_{1R}$ 、 $T_{2R}$  及  $T_r$  分别表示渐变风最大值、起动时间、终止时间及保持时间。

(4) 随机风  $V_{WN}$  则用噪声分量来描述有

$$\begin{cases} V_{WN} = 2 \sum_{i=1}^N \sqrt{S_v(\omega_i) \Delta \omega} \cos(\omega_i \phi_i) \\ \omega_i = (i - 1/2) \Delta \omega \\ S_v(\Delta \omega_i) = \frac{2K_N F^2 |\omega_i|}{\pi^2 [1 + (F\omega_i / \mu\pi)^2]^{4/3}} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\phi_i$  表示  $0 \sim 2\pi$  之间均匀分布的随机变量;  $K_N$  表示地表粗糙系数;  $F$  表示扰动范围;  $\mu$  为相对高度的平均风速;  $N$  是频谱取样点数;  $\omega_i$  是各个频段的频率。

风力机的主要结构为叶片、轮毂、齿轮箱及中间的传动装置, 其模型由笔者根据经验曲线确定, 即由实测数据经过异步电动机转速  $\omega$  和风速  $V$  来确定电机的机械转矩  $T_m$ 。

对于发电机, 采用双馈式感应发电机 (Doubly-fed Induction Generator, 以下简称 DFIG), 为方便做出如下假定: ① 假定 DFIG 三相绕组对称, 不考虑空间谐波, 且磁势沿气隙正弦分布; ② 不考虑磁路饱和和影响, 各绕组的自感和互感均线性变化; ③ 不计铁损, 不计频率、温度等变化对绕组的影响; ④ 假定转子各绕组参数已经折算到定子侧, 折算后定转子各相绕组的匝数相等。设  $d-q$  坐标系以同步转速  $n_s$  旋转, 并忽略定子绕组压降, 则电机的电压方程为

$$\begin{cases} u_{ds} = 0 \\ u_{qs} = \omega_s \psi_{ds} = U_s \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} + (L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \frac{di_{dr}}{dt} - (L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \cdot \omega_s i_{qr} + \frac{L_m}{L_s} \frac{d\psi_s}{dt} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + (L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \frac{di_{qr}}{dt} - (L_r - \frac{L_m^2}{L_s}) \cdot \omega_s i_{dr} + \frac{L_m}{L_s} \psi_s \omega_s \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $i_{dr}$ 、 $i_{qr}$  依次表示  $d$ 、 $q$  轴的转子电流;  $u_{ds}$ 、 $u_{qs}$ 、 $u_{dr}$ 、 $u_{qr}$  依次表示  $d$ 、 $q$  轴的定、转子电压;  $\psi_s$  为定子磁链;  $\omega_1$ 、 $\omega_s$  依次表示同步转速、滑差角速度。而电磁转矩  $T_e$  方程为

$$T_e = -(n_p L_m / L_s) \psi_s i_{qr} \quad (8)$$

采用电动机惯例, 则定子侧有功功率  $P_s$ 、 $Q_s$  表示为

$$\begin{cases} P_s = T_e \omega_1 = -n_p \omega_1 i_{qr} (L_m \psi_s / L_s) \\ Q_s = n_p \omega_1 \psi_s i_{ds} = n_p \omega_1 \psi_s (\psi_{ds} - L_m i_{dr}) / L_s \end{cases} \quad (9)$$

### 1.3 风电场的数学模型

目前, 对于大型风电场的建模主要分为两大类: 一类是采用详细模型, 即对风电场的每一台风电机组进行建模; 二类是基于详细模型而提出的不同程度的简化模型, 即风电场的集总模型。本文采用第二类, 并以龙里风电场为背景, 结合其风电场工作条件, 得风电场的简化模型如图 1。并利用 Matlab/Simulink 中 Simpower 子库中的三相故障模块模拟单相接地故障, Breaker 模块模拟间歇性弧光接地故障。

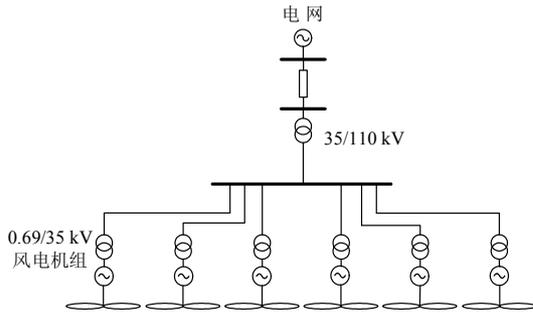


图 1 风电场简化模型

Fig. 1 Simplified model of wind farm

根据风电场的简化模型, 得其各部分参数的计算公式如下。

#### ① 发电机参数

$$\begin{cases} S_{eq} = mS, x_{m\_eq} = \frac{x_m}{m}, x_{1\_eq} = \frac{x_1}{m} \\ x_{2\_eq} = \frac{x_2}{m}, r_{1\_eq} = \frac{r_1}{m}, r_{2\_eq} = \frac{r_2}{m} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $m$  表示等值为一台风电机组的台数;  $S$  表示发电机容量;  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $r_1$ 、 $r_2$  表示定、转子的电抗和电阻;  $x_m$  表示发电机激磁电抗。

#### ② 等值惯性常数

$$T_{eq} = \frac{1}{S_M} \sum_{j=1}^m T_j S_j \quad (11)$$

式中:  $S_j$  和  $T_j$  分别表示第  $j$  台发电机的容量和惯性时间常数;  $S_M$  表示  $m$  台发电机容量之和;  $T_{eq}$  是  $m$

台等值发电机的惯性时间常数。

#### ③ 变压器参数

$$S_{T\_eq} = mS_T, Z_{T\_eq} = \frac{Z_T}{m} \quad (12)$$

式中:  $S_T$  是变压器容量;  $Z_T$  是变压器阻抗。

#### ④ 控制参数

有功功率和无功功率测量模块的等值基准容量为

$$S_{eq} = mS \quad (13)$$

#### ⑤ 无功功率控制参考值

$$Q_{ref\_eq} = \sum_{i=1}^m Q_{ref\_i} \quad (14)$$

式中,  $Q_{ref}$  为风电机组的无功功率控制参考值。

#### ⑥ 电缆参数

根据表 1 中电缆线路的电容值  $0.1808 \mu\text{F}/\text{km}$  及参考图 1 的电缆网络分布, 计算得风电场  $35\text{kV}$  电缆网络的的对地电容电流大小约为  $143.14\text{A} (>100\text{A})$ , 该值将直接影响后文中性点经消弧线圈接地、小电阻接地方式等在数值上的选取问题。

表 1 电缆参数

Table 1 Cable parameters

电缆截面 /mm <sup>2</sup>	导体直径 /mm	绝缘厚度 /mm	护套厚度 /mm	电缆外径 /mm
185	16.2	10.5	3	50
电阻/ (mΩ/km)		电感/ (mL/km)	电容/ (μF/km)	频率/Hz
0.000 132		0.235 7	0.180 8	50

## 2 电缆网络中性点运行特性分析

传统风电场  $35\text{kV}$  系统中性点运行方式有三种, 即中性点不接地、中性点经消弧线圈接地和经小电阻接地<sup>[11-16]</sup>, 但这三种基本中性点接地方式, 在不同条件下相比于电缆网络情况, 差异性较大。利用 Matlab/Simulink 软件平台, 通过仿真分析不同接地故障时刻、接地故障点位置、接地故障点过渡电阻及接地电容电流等影响因素下, 发生不同接地故障形式时电缆网络的运行特性, 即仿真计算衡量中性点不同接地方式下最重要的两大技术指标: 系统的过电压水平和接地故障点电流水平, 计算结果如表 2 所示。

表 2 表明, 当电缆网络发生单相金属性永久接地故障时, 故障初始阶段, 中性点不接地和经消弧线圈接地方式均未起到限制系统过电压作用。暂态过程结束后, 中性点经小电阻接地方式下, 过电压水平最低, 对设备绝缘水平要求最低, 且接地故障点的残流( $550\text{A}$ )较大, 有利于快速切除故障线路,

表 2 电缆网中性点不同接地方式下的仿真结果

Table 2 Simulation results of different neutral grounding modes in cable network

故障类型	接地方式	暂态过电压/p.u.			工频过电压/p.u.			$I_{dm}/kA$	$I_{\beta}/A$
		$U_{bm}$	$U_{cm}$	$U_{om}$	$U_{bm}$	$U_{cm}$	$U_{om}$		
金属性永久接地	不接地	1.970	1.979	1.176	1.688	1.691	0.798	5.01	140
	经消弧线圈	1.965	1.971	1.156	1.681	1.682	0.782	5.01	5
	经小电阻	1.794	1.810	0.854	1.655	1.701	0.788	5.01	550
间歇性电弧接地	不接地	2.495	2.489	1.593	—	—	—	9.77	140
	经消弧线圈	1.965	1.971	1.156	1.691	1.692	0.787	5.01	5
	经小电阻	1.803	1.854	0.857	—	—	—	5.26	550

注: 因中性点不接地和中性点经小电阻接地方式下, 发生间歇性弧光接地故障时, 暂态过程较强烈, 无法得到故障期间的工频过电压值, 故表中未列出。

保证非故障相的供电可靠性。而当电缆网络发生间歇性弧光接地故障时, 因消弧线圈的快速补偿作用, 中性点经消弧线圈接地方式很好的降低了系统的过电压水平, 并且残流为 5A(<10 A), 电弧可靠熄灭, 较中性点经小电阻接地方式下, 明显减少了故障的跳闸率。综上所述, 对于风电场 35 kV 电缆网络系统中性点的不同接地方式, 各有其适应性。

### 3 中性点复合接地方式研究

由表 2 的仿真结果可知, 目前风电场 35 kV 电缆网络单一的中性点接地方式, 主要存在两大问题, 即大电流接地系统跳闸率较高和小电流系统选线困难并伴随较高暂态过电压。对此本章提出了中性点经消弧线圈配合小电阻的复合接地方式, 即当系统发生单相接地故障时, 消弧线圈进行快速补偿, 减小故障点残流, 若为瞬时性故障则故障消失, 否则投入小电阻启动零序电流保护快速切除故障。

#### 1) 工作原理

以消弧线圈为基础, 当系统对地电容电流  $I_C > 100 A$  时, 发生单相金属性永久接地故障时, 直接短时并入小电阻, 有效启动零序电流保护, 快速切除故障线路; 当系统对地电容电流  $I_C < 100 A$  时, 先并中值电阻泄放较高的暂态过电压能量, 暂态结束后立即退出中值电阻, 而后的操作同于单相金属性永久接地故障情况, 具体工作原理如图 2 所示。

另外, 考虑到中值电阻一般在半个工频周期即可泄放掉电弧燃熄积累的多余电荷, 故其投运半个工频周期立刻退出; 而用于启动故障跳闸的小电阻取值应保证其动作的可靠性, 并根据国外以电缆为主的配网实验可知, 当其电阻中流过的电流为

400~800 A 左右时不会对通信系统产生太大干扰。对于小电阻的延迟, 则应考虑现场的运作经验和相关电气设备的动作速度等。

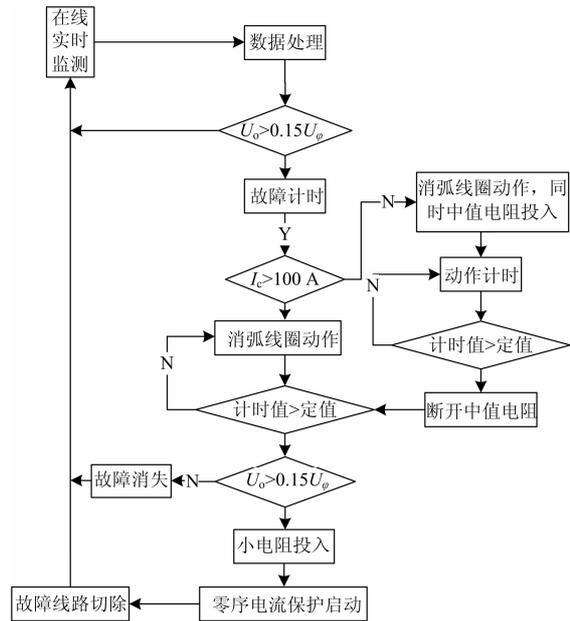


图 2 中性点经消弧线圈配合小电阻接地的工作原理

Fig. 2 Working principle of neutral grounding via arc suppression coil cooperated with low resistance

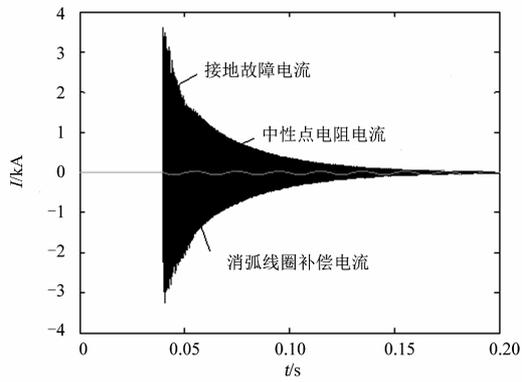
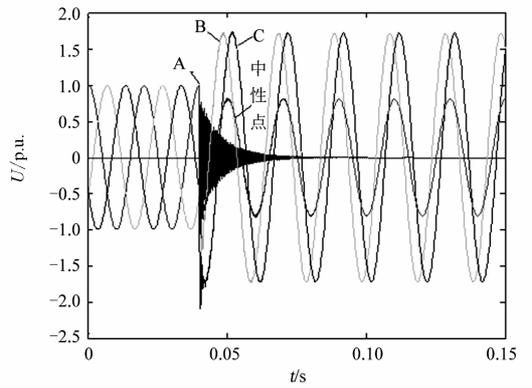
#### 2) 仿真验证

仿真仍以本文初始的电路为基础, 并通过停运集电线路回数来模拟电容电流水平  $I_C > 100 A$  (6 回路投运) 和  $I_C < 100 A$  (投运 2 回路, 停运 4 回路) 两种情况。

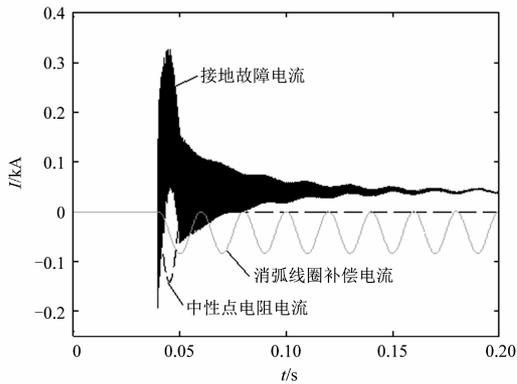
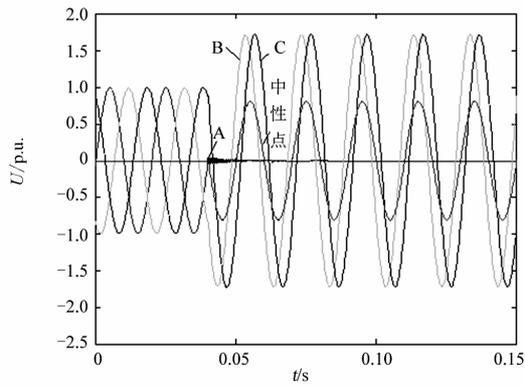
对于电容电流  $I_C < 100 A$  的电缆网络, 依据文献 [17], 当系统接地电流有功分量与系统接地电容电流之比即  $I_R / I_C > 3$  时, 抑制暂态过电压效果已不明显, 故并联的中值电阻取 200  $\Omega$ 。仿真不同时刻发生单相(A 相为例)金属性永久接地故障时, 结果同于中性点经消弧线圈接地情况, 即在一个工频周期内出现系统暂态过电压和过电流最大值和最小值的时刻有两个, 依次在故障相为峰值和零值附近。

其中, A 相幅值发生接地故障时, 非故障相和中性点的暂态过电压最大值依次为 2.099 5 p.u. 和 1.116 4 p.u., 暂态电流最大值为 3.64 kA, 相比于中性点经消弧线圈接地情况(对应值为 2.248 4 p.u. 和 1.340 1 p.u., 3.55 kA), 暂态过电压幅值明显下降, 且满足电缆绝缘要求 (2.6 p.u.)。另外, 虽然故障电流略微增大, 但时间非常短, 并且可采用晶闸管控制实现中值电阻的有效投切。其电容电流小于 100 A 的电缆网络 A 相为 90° 和 0° 时发生接地故障时的暂态波形如图 3 所示, 图 4 为延迟投入

小电阻时系统的暂态波形。

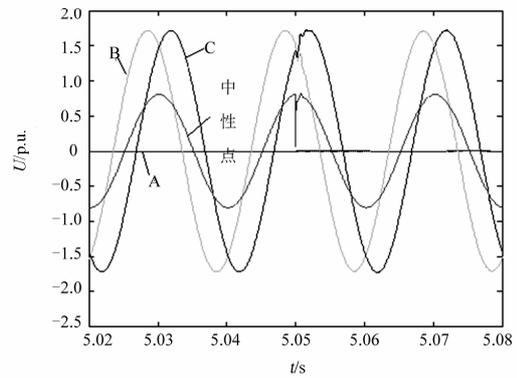
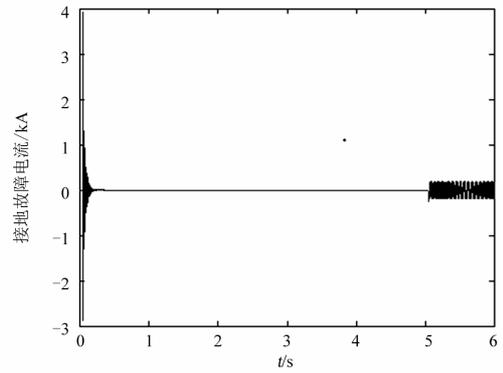


(a) A相为90°

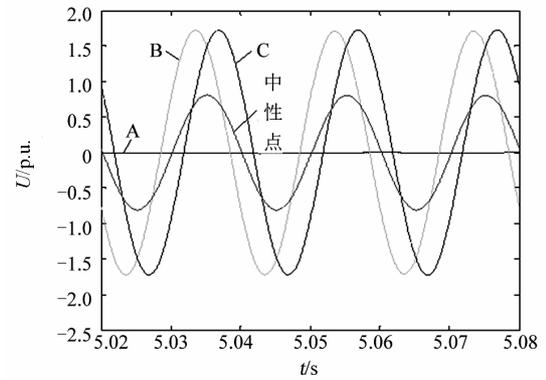
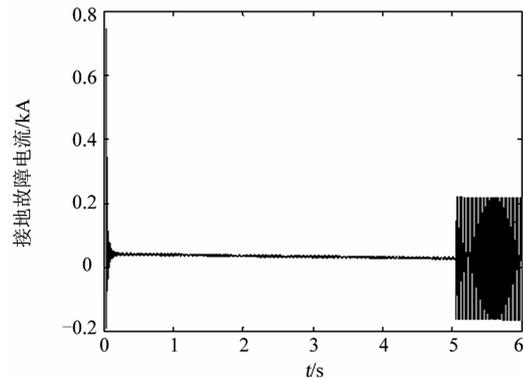


(b) A相为0°

图3 投入中值电阻时的暂态电压和电流波形  
Fig. 3 Transient voltage and current waveform by inputting middle-resistance



(a) A相为90°



(b) A相为0°

图4 延迟投入小电阻时的暂态电流和电压波形( $I_C < 100$  A)  
Fig. 4 Transient current and voltage waveform by delaying input low-resistance ( $I_C < 100$  A)

当系统对地电容电流大于 100 A 时, 因中性点经消弧线圈接地时, 暂态过电压水平能满足电缆绝缘要求, 故无需采取限压措施, 直接延迟投入小电阻, 其系统的暂态波形如图 5 所示。

图 4 和图 5 表明, 改进中性点运行方式有效地避免了目前龙里风电场单一的中性点经小电阻 ( $R_d=47 \Omega$ ) 接地方式下跳闸率较高的问题, 满足电缆网络系统对永久接地和瞬时接地故障的性能要求, 即永久接地故障时能有效启动零序电流保护, 而瞬时性接地故障时则能通过消弧线圈的补偿作用而快速消弧, 该方式兼备了中性点经小电阻和消弧线圈两种接地方式下的优点。由图 4 和图 5 中 A 相为  $90^\circ$  时的暂态电压波形可知小电阻的投入不会对系统造成冲击, 相反还能进一步降低中性点电压。

### 3) 主要设备的选择

根据以上改进中性点运行方式的工作原理和仿真实验证知, 需要选择的中性点设备主要包括: 具有自动跟踪补偿功能的消弧线圈、分别实现限压和快速跳闸的并联电阻器以及构造中性点的接地变压器<sup>[18]</sup>。

消弧线圈的容量需凭借现场的电容电流水平, 并考虑 5~10 年的发展趋势, 按公式(15)计算。

$$Q = 1.35 I_C \frac{U_n}{\sqrt{3}} \quad (15)$$

式中:  $Q$  为消弧线圈容量, kVA;  $I_C$  为接地电容电流;  $U_n$  为系统的标称电压。根据龙里风电场的网络参数, 计算得  $I_C=133.35$  A, 则  $Q=3\ 637.76$  kVA, 故可选型号为 XDZ1-4400/35 的油浸式消弧线圈(额定容量 4 400 kVA, 系统电压 38.5 kV, 额定电流 100~200 A)。

根据文献[17], 中值电阻(限压功能)和小电阻(快速跳闸)依次按  $I_R/I_C=2\sim 3$  和  $I_R/I_C>3$  ( $I_R$ 、 $I_C$  含义同前文)取值, 电阻器的额定电压一致于电网电压, 额定电流则应满足电阻器在额定电压下 10~60 s 的热效应要求。

接地变选用 ZN 型曲折接线, 并按其连续工作 2 h 内承受的最大接地故障电流来确定其容量, 据文献[19], 则其短时容量计算如式(16)。

$$S_{d,r} = 0.576 U_L I_{j,d} \quad (16)$$

式中:  $S_{d,r}$  为接地变的短时容量, kVA;  $U_L$  为线电压, kV;  $I_{j,d}$  为单相接地故障电流, A。则接地变的额定容量为

$$S_{e,r} = S_{d,r} / K \quad (17)$$

式中:  $S_{e,r}$  为接地变额定容量;  $K$  为换算系数。根据 IEEE-C62.92.3 标准, 当过载时间为 2 h 时,  $K$  取 1.4,

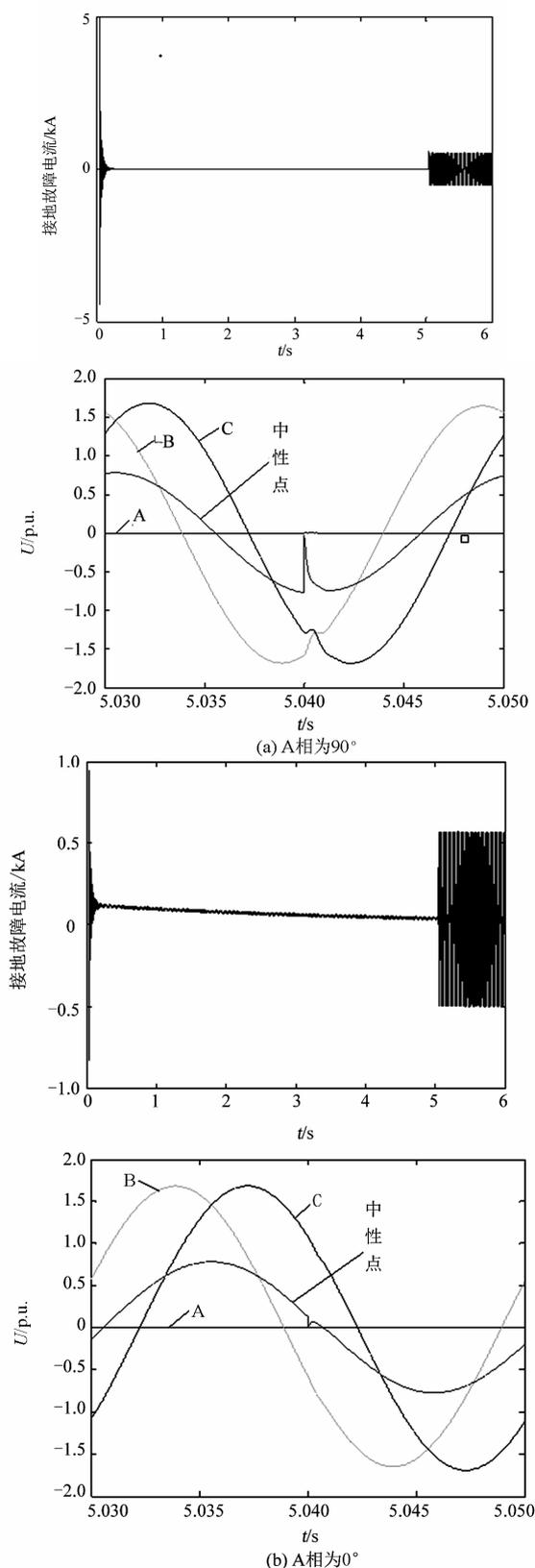


图 5 延迟投入小电阻时的暂态电流和电压波形 ( $I_C>100$ A)  
Fig. 5 Transient current and voltage waveform by delaying input low-resistance ( $I_C>100$  A)

得  $S_{e,r}=1\ 920.24\ \text{kVA}$ ，并根据接地变与消弧线圈容量的配合关系( $S_{e,r}=1.15Q$ )，故选用 DKS1-4400/35，容量为 4400 kVA，额定电压为 38.5 kV 的接地变压器。

综上，在满足电缆线路绝缘水平、接地电容电流水平等要求下，针对笔者提出的改进中性点接地方式，是能够进行电气设备选取的，具有较高的可操作性。

#### 4 结论

1) 仿真分析中性点的三种基本接地方式可知，单一的接地方式在电缆网里各有其适应性，主要存在两方面问题，即大电流接地系统跳闸率较高和小电流系统选线困难并伴随较高暂态过电压。

2) 改进中性点接地方式下，针对不同接地电容电流水平，计算分析得改进方式综合了中性点经消弧线圈接地可快速消弧和经小电阻接地快速切出故障线路的优点，并且电阻的投切对系统不造成冲击，不影响设备的正常安全运行。

3) 从主要设备选取的分析计算过程可知，选定的相关设备是可以达到相关的技术要求的，可操作性强。

#### 参考文献

- [1] 苏继峰. 配电网中性点接地方式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 141-148.  
SU Jifeng. Research of neutral grounding modes in power distribution network[J]. Power System Technology, 2013, 41(8): 141-148.
- [2] 董雷, 何林, 蒲天骄. 中性点接地方式对配电网可靠性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 96-101.  
DONG Lei, HE Lin, PU Tianjiao. Effect of neutral grounding mode on reliability of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 96-101.
- [3] 林峰, 张兰英, 吕庭钦, 等. 风电场接地变及其中性点接地电阻的改进方案分析[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(2): 126-130.  
LIN Feng, ZHANG Lanying, LÜ Tingqin, et al. Analysis of the improved scheme for grounding transformer and its neutral point grounding resistance in the wind farm[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(2): 126-130.
- [4] 郑晶晶, 杨勇, 邢延东, 等. 风电场 35 kV 系统优化设计及稳定运行技术探讨[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(5): 93-96.  
ZHENG Jingjing, YANG Yong, XING Yandong, et al. Technical discussions on the optimized design and stable operation of the 35 kV for wind farms[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(5): 93-96.
- [5] 葛江北, 周明, 李庚银. 大型风电场建模综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 146-153.  
GE Jiangbei, ZHOU Ming, LI Gengyin. Review on large-scale wind farm modeling[J]. Power System Technology, 2013, 41(17): 146-153.
- [6] 曹娜, 于群, 戴慧珠. 计及随机波动风速、风向的风电场建模方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(4): 85-90.  
CAO Na, YU Qun, DAI Huizhu. A study on wind farm modeling method with the stochastic volatility of wind velocity and wind direction considered[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(4): 85-90.
- [7] 时锐, 焦然, 陈艳霞. 含大规模风电电网的静态电压仿真分析[J]. 高压电器, 2014, 50(12): 105-110.  
SHI Rui, JIAO Ran, CHEN Yanxia. Static voltage simulation analysis of grid with large-scale wind power[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(12): 105-110.
- [8] 米增强, 苏勋文, 杨奇逊, 等. 风电场动态等值模型的多机表征方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(5): 162-169.  
MI Zengqiang, SU Xunwen, YANG Qixun, et al. Multi-machine representation method for dynamic equivalent model of wind farms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 162-169.
- [9] 侯婷婷, 娄素华, 吴耀武, 等. 含大型风电场的电力系统调峰运行特性分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 105-111.  
HOU Tingting, LOU Suhua, WU Yaowu, et al. Analysis on peak load regulation operation characteristics of power system integrated with large-scale wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 105-111.
- [10] 白挺玮. 中压电缆网运行方式及故障模型仿真分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.  
BAI Tingwei. The simulation and analysis of medium voltage cable network operation modes and fault model[D]. Kunming: Kunming University of Science,

- 2012.
- [11] 徐波, 张建文, 蔡旭, 等. 电网不对称条件下小电流接地系统接地相辨识[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 175-182.
- XU Bo, ZHANG Jianwen, CAI Xu, et al. Grounding phase determination in non-effective grounding systems in case of unsymmetrical voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 175-182.
- [12] 付晓奇, 徐粮珍, 赵宝丽. 10 kV 配网中性点小电阻接地技术与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 227-230.
- FU Xiaoqi, XU Liangzhen, ZHAO Baoli. Discussion on the technology and application of 10 kV distribution network neutral grounding through small resistance[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 227-230.
- [13] 刘渝根, 丁伯剑, 袁涛. 山区35 kV电网中性点新型运行方式研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(1): 32-34.
- LIU Yugen, DING Bojian, YUAN Tao. New neutral point operation method of 35 kV grid in mountainous area[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(1): 32-34.
- [14] MARCINIAK L. Model of the arc earth-fault for medium voltage networks[J]. Central European Journal of Engineering, 2011, 1(2): 168-173.
- [15] 沈家新. 消弧线圈及小电阻一体化接地方式在变电站的运用研究[J]. 低碳世界, 2014(1): 71-72.
- SHEN Jiixin. Application and research on Petersen coil and low resistance grounding in substation integration[J]. Low Carbon World, 2014(1): 71-72.
- [16] 朱珂, 裴佑楠, 陈晨, 等. 自适应控流型故障选线方案[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 174-182.
- ZHU Ke, PEI Younan, CHEN Chen, et al. Self-adaptable and current controllable faulted line identification scheme[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8): 174-182.
- [17] 李润先. 中压电网系统接地实用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [18] 张永立. 重构中性点的曲折接线变压器分析[J]. 变压器, 1995, 32(1): 6-7.
- ZHANG Yongli. Reconstruction of the neutral point of the transformer winding wiring analysis[J]. Transformer, 1995, 32(1): 6-7.
- [19] 平绍勋, 周玉芳. 电力系统中性点接地方式及运行分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- 
- 收稿日期: 2014-09-28; 修回日期: 2014-11-22
- 作者简介:
- 刘渝根(1963-), 男, 硕士, 教授, 从事高电压工程、电力系统过电压与接地技术的教学和科研工作; E-mail: cd\_yugen\_liu@163.com
- 许晓艳(1991-), 女, 硕士研究生, 从事接地技术与电力系统过电压研究。E-mail: cd\_xiaoyan\_xu@163.com
- (编辑 张爱琴)