

Study of Configuration and Optimization for Interphase Spacers of 750kV Compact Transmission Line

Kuanjun ZHU, Xinmin LI

China Electric Power Research Institute, Beijing, China, 102401

Email: zhukuanjun@epri.sgcc.com.cn lixm@epri.sgcc.com.cn

Abstract: It is significance to study the flashover characteristic of 750kV overhead transmission line. Aiming to the issue of windage yaw flashover fault because of asynchronous swaying between the phases in compact overhead transmission line, the calculation model of conductor system is set up through the combined wind load model with operating experience of transmission line. Making use of the unconditional stable Newmark method and load-increment method, the nonlinear dynamic response for asynchronous swaying in compact transmission line is researched. The character of asynchronous swaying in compact transmission line was obtained after the conductor nonlinear response is analyzed under different wind load model, then the corresponding prevention measures and configuration of interphase spacers is given. The research result indicate that there is a better consistency between the calculation result with operation experience, and the prevention measure of control asynchronous swaying is effective. This obtained research result can not only provide the design foundation for the windage yaw flashover of the compact transmission, but also reduce the configuration number of interphase spacers and line project cost.

Keywords: 750kV Compact Transmission Line; Asynchronous Swaying Character; Steady-state Wind model; Combinatory Wind Model; Configuration and Optimization for Interphase Spacers

750kV 紧凑型输电线路相间间隔棒配置及优化研究

朱宽军, 李新民

中国电力科学研究院, 北京, 中国, 102401

Email: zhukuanjun@epri.sgcc.com.cn lixm@epri.sgcc.com.cn

摘要: 针对 750kV 紧凑型输电线路中相间非同期摇摆引起的风偏闪络问题, 结合线路运行经验, 选取不同的风荷载模型, 建立了导线系统的计算模型, 并利用无条件稳定 Newmark 法与荷载增量法, 研究了紧凑型输电线路非同期摇摆状态下的非线性动力学响应。通过分析不同风荷载激励模型下的导线强迫非线性响应问题, 得到了紧凑型线路非同期摇摆特性, 并给出了相应防治措施中相间间隔棒的配置方案。研究表明, 该荷载模型计算结果与线路运行经验吻合, 可为紧凑型输电线路的风偏闪络设计提供理论依据, 合理地优化相间间隔棒配置数量, 在保障线路安全稳定运行的情况下, 降低工程造价。

关键词: 750kV 紧凑型输电线路; 非同期摇摆; 稳态风模型; 组合风模型; 相间间隔棒优化配置方案

引言

随着我国国民经济的持续发展, 用电负荷快速增长, 输电容量逐步增大, 线路走廊及大型电站的出线等问题日趋严峻, 对长距离、大容量输电的模式提出了新的要求, 工业发展用地与高压线路走廊的矛盾也越来越突出, 成为输电线路建设的主要问题之一。紧凑型输电线路相间距离减小, 可以提高自然输送功率, 降低获得线路走廊的费用, 减少对环境的影响, 增大

线路的自然功率, 提高线路的输送效率。

在紧凑型线路中相间非同期摇摆闪络事故的力学计算中, 风荷载的选取十分重要, 不同荷载的选择对相间非同期摇摆特性分析的结果影响较大。在现有的输电线路相间非同期摇摆分析的风荷载计算模型中, 大都沿用稳态风模型^[1], 并依据该模型进行相应防治措施研究, 相间间隔棒配置方案的不尽合理。因此, 需要结合已有线路运行情况, 合理选取风荷载模型, 在保证紧凑型输电线路的安全稳定运行的基础上, 选择合适的相间间隔棒配置方案, 并进行优化分析研究, 合理选择相间间隔棒的配置数量, 降低工程造价。

国家自然科学基金项目 (50908218)

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (50908218)

本文以 750kV 紧凑型线路导线为研究对象, 利用有限元方法建立了分裂导线系统的动力学分析模型, 采用无条件稳定 Newmark 方法和荷载增量法相结合, 对相导线的风偏和非同期摇摆特性进行了理论分析和研究, 并结合不同的荷载模型, 给出了不同情况下的相导线风偏特性和防治措施中相间间隔棒的配置方案。分析研究结果可为 750kV 紧凑型输电线路风偏/非同期摇摆防治措施的设计提供理论指导和技术支撑, 具有一定的工程指导意义。

1. 导线系统动力学分析模型

对导线非同期摇摆的强迫振动响应问题, 需要应用瞬态动力学分析方法, 对相导线在风荷载激励下的响应位移进行预估, 并求解导线初始静平衡状态和非线性振动结构响应, 得到不同风荷载激励模型情况下相导线相对位移变化结果, 并根据相关规程, 验证不同工况下相导线间隙是否满足要求。在实际工程应用该方法进行导线非同期摇摆分析, 以此检验防治非同期摇摆的防治效果, 是一种有效可行的方法。

1.1 架空线路导线计算模型

考虑架空导线的刚性时, 其具有一定刚度, 能承受一定的弯矩, 其悬挂的几何形状不同于柔性导线的曲线方程所表示的形状, 要求得考虑导线刚性时的曲线方程, 得到导线任一点上的曲率, 从而就能求得曲线上附加的静弯曲应力。计算模型有如下假设: (1) 导线两端均为耐张塔; (2) 导线通过耐张绝缘子与塔连接; (3) 耐张串与塔身为固支连接方式; (4) 考虑数值计算的精确性, 采用悬链线方程模拟导线的弧垂曲线。

导线、分裂导线子间隔棒以及相间间隔棒均采用梁单元, 在空间具有六个方向自由度, 相间距为 10m, 三相六分裂导线模型如图 1 所示, 导线型号及物理特性参数如表 1 所示。

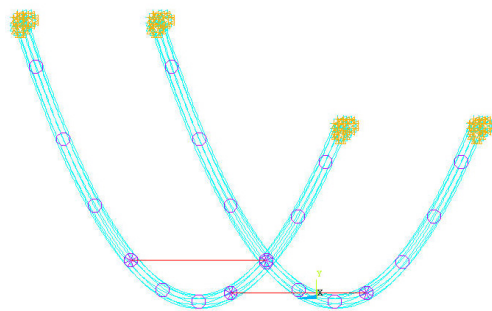


Fig.1 the FEM of bundle conductors

图 1 分裂导线有限元分析计算模型

导线发生非同期摇摆是由于水平两相导线受风时间差引起的, 本研究中取最大风速 (工频电压情况下) 为 35m/s, 操作过电压时风速取为最大风速的一半, 即 18m/s, 由线路风荷载计算公式, 可得到风速下风荷载最大值。根据《110~750kV 架空送电线路设计技术规定》^[2]及《220kV~500kV 紧凑型架空送电线路技术规定》^[3]规定, 在海拔不超过 1000m 的地区, 塔头结构间操作过电压相间最小间隙, 以及考虑导线风偏时档中工频电压和操作过电压相间最小间隙, 不应小于表 2 所列数值。

Tab.1 the type and physical properties of LGJ-400/35 conductor
表 1 LGJ-400/35 导线规格及物理性能

计算截面 mm ²	外径 mm	计算拉断力(N)	质量 kg/km	弹性系数 MPa	线膨胀系数
425.24	26.82	98700	1349	65000	20.5e-6

Tab.2 the minimum phase spacing under power frequency voltage and switching overvoltage

表 2 工频电压和操作过电压相间最小间隙 (m)

标称电压(kV)	220		500		750	
校验位置	塔头	档中	塔头	档中	塔头	档中
操作过电压相间最小间隙 (m)	2.4	2.1	5.2	4.6	7.5	6.8
工频电压相间最小间隙 (m)	0.9		2.2		2.9	

1.2 导线非线性动力有限元分析

导线系统的非同期摇摆是一种典型的动力学现象, 但静平衡位置是动力分析的初始条件, 它对计算结果影响非常显著, 因此, 首先进行导线的静平衡分析。将输电导线的静平衡看作为大位移, 小应变的几何非线性问题, 则其非线性静力方程可表示为:

$$(K_0^e + K_\sigma^e) \Delta u_e = F_e - Q_e^p \quad (1)$$

式中, K_0^e 为线性刚度矩阵; K_σ^e 为初应力刚度矩阵; F_e 为等效节点载荷向量, 主要包括覆冰载荷及重力; Δu_e 为节点位移增量向量; Q_e^p 为节点不平衡力向量。首先利用整体坐标下的节点位移建立各单元的局部坐标, 然后计算在局部坐标下各单元的位移列阵 $\{\delta'\}^e$, 建立在局部坐标下各单元的刚度矩阵 $[k']$, 并计算节点力 $\{F'\}^e = \{\delta'\}^e [k']$ 。通过坐标变换将 $[k']$ 和 $\{F'\}^e$ 变换到整体坐标中, 然后集合各单元刚度矩阵形成新

的总刚度矩阵, 计算各单元作用到节点上的力, 作为不平衡力加在外载上计算, 得到位移增量, 累加到整体节点位移中然后重新迭代, 直到位移增量达到收敛要求为止。

研究在强风中的单相导线的风偏及水平排列两相导线的非同期摇摆行为, 首先建立单相导线的坐标图如图 2 所示。

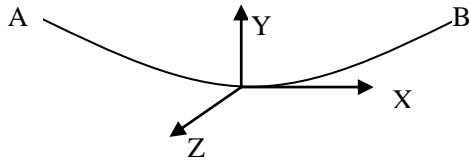


Fig.2 the reference frame of single conductor
图 2 单相导线坐标系统

根据达朗伯原理, 考虑到导线及其附加质量的重力, 风作用于导线上的压力、阻尼力、惯性力, 导线系统的六自由度非线性动力学方程可以表示为:

$$M\ddot{d}(t) + C\dot{d}(t) + Kd(t) = F(t) \quad (2)$$

其中, M , K 和 C 分别是结构总体质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵, 由单元质量矩阵 M^e 、单元刚度矩阵 K^e 和单元阻尼矩阵 C^e 组集而成; $d(t)$ 和 $F(t)$ 分别为 t 时刻结构总体位移矩阵和载荷矩阵; $\ddot{d}(t)$ 和 $\dot{d}(t)$ 分别是 t 时刻结构总体加速度矩阵和速度矩阵; $F(t)$ 为静载和动载的组合, 其中动载主要为空气动力载荷。

本研究中采用无条件稳定的 Newmark 方法与荷载增量法相结合求解动力学方程: 首先将荷载分成若干个增量, 然后对每一荷载增量的方程非线性方程线性化, 从而使这一非线性动力学问题分解为一系列线性问题, 进而得到导线的非线性动力学响应结果。

1.3 输电线路风荷载模拟

对于输电线路中的风偏闪络问题, 龙立宏等^[9]对风偏放电的影响因素进行了研究, 胡毅等^[5]对风雨共同作用下的导线-杆塔的空气间隙变化也进行卓有成效的工作, 针对塔线体系的风荷载问题, 赵桂峰等^[10]、柳国环等^[10]对其风荷载动力响应等进行了相应的试验和理论研究。此外, 紧凑型线路中导致的风致振动导线疲劳及稳定性问题, 也与风荷载的作用模式、最大设计风速、风压不均匀系数、风速高度变化系数以及地形地貌有关, 国内外的一些学者也进行了一些有关的研究^{[10]~[12]}。

针对紧凑型线路的设计、施工和运行中的机械力学分析计算问题, 尤其是关于风荷载的选择方式, 仅仅是参考建筑结构的荷载方案^{[13]~[15]}, 或者是进行模拟和试验研究分析^{[16][17]}, 没有更好地结合线路运行经验, 针对输电线路结构的特殊性进行分析和研究。因此, 有必要研究适合输电线路风偏/非同期摇摆计算中的风荷载模型, 选择合理的风荷载参数, 建立相间间隔棒的配置及优化方案。

任意高度处风速 $V(z, t)$ 可表达为平均风速 $\bar{V}(z)$ 和脉动风速 $v(z, t)$ 之和, 即:

$$V(z, t) = \bar{V}(z) + v(z, t) \quad (3)$$

假设平均风速沿高度呈指数形式变化, 即在任意高度 z 处的平均风速 v_z 为:

$$v_z = v_{10}(z/10)^\alpha \quad (4)$$

式中 v_{10} 为 10m 处的平均风速, α 为地面粗糙度参数。

脉动风为随机过程, 需要用随机振动理论处理, 从脉动风大量的实测记录的样本时程曲线统计分析可知, 脉动风可用具有零均值的高斯平稳随机过程来表达, 且具有明显的各态历经性。功率谱密度函数是其重要的统计特性, 反映了某一频域上脉动风能量大小。

根据强风的观察表明, 一次阵风作用, 在结构迎风面上各点处的风速和风向并不是完全相同的, 为此, 对于结构上的脉动风荷载必须考虑空间相关性。考虑到结构前后风压相关性较复杂, 一般认为其是完全相关的。结构风振响应分析需要大量满足某种给定条件的模拟的风记录, 而要使模拟的风荷载在实际结构分析中应用, 就要求模拟风尽可能接近或满足自然风的特性, 方法上需要有普遍性和有效性。目前, 对于脉动风速时程的模拟主要采用有线性滤波法、谐波叠加法、逆傅里叶变换法和小波分析法等^{[18][19]}。

结合输电线路导线系统的结构特性, 考虑三相导线的相间距而引起的受风时间差, 本文采用谐波叠加法, 模拟建立了三相导线的风荷载计算模型, 对最大 35m/s 风速 (工频电压) 和 18m/s 风速 (操作过电压) 的情况, 给出了组合风荷载模型的风荷载时程模拟曲线, 如图 3、4 所示。

2 相间非同期摇摆特性分析

对于相导线间非同期摇摆动力学的强迫响应问题, 本文中首先应用瞬态动力学分析方法, 对水平两相分裂子导线在风荷载激励下的位移和应力进行预

估, 得到不同风荷载激励模型情况下的导线位移响应及应力变化结果。然后采用导线强迫响应瞬态分析方法, 从导线初始静平衡状态到非线性振动结构响应的求解均应用成熟的通用软件, 对于工程应用该方法进行导线风偏及非同期摇摆分析以及检验防风偏措施效果提供了一种方便可行的方法。

作为对比, 本文也给出了稳态风作用下的相导线间非同期摇摆特性分析结果。

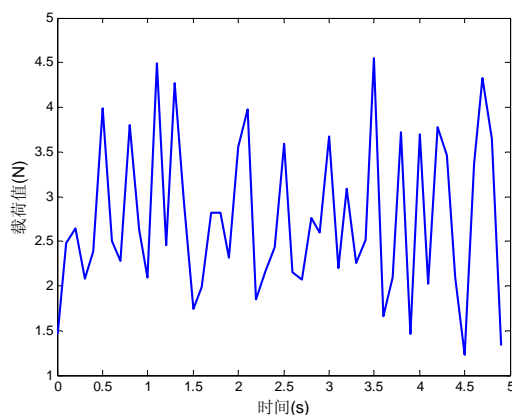


Fig.3 time-history curve of combination wind speed load under switching overvoltage (wind speed 18m/s)
图 3 操作过电压 (18m/s) 下风荷载图

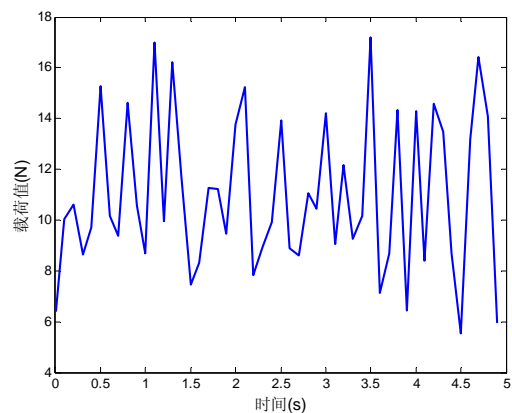


Fig.4 time-history curve of wind speed load under power frequency voltage (wind speed 35m/s)
图 4 工频电压 (35m/s) 下风速时程曲线及风荷载图

2.1 稳态风荷载作用下非同期摇摆特性

利用稳态风模型理论, 对 750kV 紧凑型输电线路水平两相导线在稳态风作用下的动态非同期摇摆过程进行了计算模拟, 并且考虑了档距长度对风偏结果的影响。工频电压及操作过电压的气象条件的平均风速分别为 35m/s 和 18m/s, 考虑最恶劣风荷载作用情况, 结合线路的设计参考资料, 本文中选择代表性的

300m、400m 和 500m 档距进行了分析和计算。

由计算分析得到相导线档距中心点最大偏移距离及水平两相导线档距中点相间最小空气间隙, 如表 3 所示。结合相关设计规程^[9]可知, 在海拔不超过 1000m 的地区, 对档距 300m、400m 和 500m 的线路, 满足工频气象及操作过电压条件下最小电气间隙要求, 稳态风荷载作用下不会发生非同期摇摆相间闪络事故。

Tab.3 the minimum phase spacing of asynchronous swaying of conductors at steady-state wind

表 3 稳态风模型时工频电压和操作过电压相间最小间隙 (m)

档距	风速	中点相间最小距离	相间放电
300	35 m/s	8.30 m	安全
	18 m/s	8.56 m	安全
400	35 m/s	7.93 m	安全
	18 m/s	8.28 m	安全
500	35 m/s	7.89 m	安全
	18 m/s	8.23 m	安全

在水平两相导线非同期摆动初期, 由于受风时间差, 相间距离会由初始的静态平衡时的间隙距离逐渐减小, 在相间距达到最小值后渐渐地增大, 最终超过两相导线间的初始设计间距, 随着时间的推移间距又逐渐减小。在稳态风的持续作用下, 相导线往复在平衡位置摆动, 其相间距离也周期性地减小—增大—减小, 并逐步趋于稳定状态, 输电线路不会发生非同期摇摆的影响而发生相间闪络。

2.2 组合风荷载作用下非同期摇摆特性

同样利用 1.3 中给出的组合风荷载时程曲线, 得到相导线档距中心点最大偏移距离及水平两相导线档距中点相间最小空气间隙, 如表 4 所示。结合相关设计规程^[9]可知, 档距为 300m、400m、500m 时, 均可满足工频气象条件最小空气间隙要求, 但当线路档距大于 300m 时, 最小电气间隙不能满足操作过电压情况相间最小间隙值 6.8m 的要求有可能发生由于非同期摇摆的相间闪络事故, 必需要采取相应的防治措施, 以避免相间闪络事故的发生。

3. 相间非同期摇摆防治措施及优化

根据 750kV 紧凑型输电线路振动特性, 连接和固定相导线的相间间隔棒不宜安装在同一平面内, 该安装方式中由于相间绝缘间隔棒安装在同一平面内时, 使得三相导线的动态特性相似, 当有风能输入时, 可能引起三相导线发生半波数相同的同步振动, 线路振

动能量的累加，导致线路相导线间空气间隙不足，甚至引起线路的机械力学故障，发生结构破坏事故。如将相间间隔棒错开安装，不仅可使一档分割为多个大的次档距，使三相导线的动态特征不同，扰乱其同步性，达到吸收振动能量、降低振幅和抑制导线振动的目的，还能改善相间间隔棒、导线以及子导线间隔棒的受力条件，减少相导线扭转产生的扭转力矩使相间间隔棒承受的弯曲载荷，降低安装点处导线的动弯应变，延长相间绝缘间隔棒使用寿命。

Tab.4 the minimum phase spacing of asynchronous swaying of conductors at combination wind

表 4 组合风模型时工频电压和操作过电压相间最小间隙 (m)

档距	风速	中点相间最小距离	相间放电
300m	35 m/s	5.3510m	安全
	18 m/s	6.7561m	危险
400 m	35 m/s	5.0883m	安全
	18 m/s	6.5421m	危险
500 m	35 m/s	4.5666m	安全
	18 m/s	6.2624m	危险

目前，针对防风偏/非同期摇摆的设计，国内外均没有详细的相间间隔棒的布置方式，大多是考虑防舞措施采取的布置方式，仅考虑了设置相间间隔棒时的最小档距范围，对相间间隔棒布置位置和方式的研究较少，尤其是针对不同气候条件、不同地形变化等情况，没有针对性的线路设计及其经济性分析，通常在线路全线使用同一标准设计和安装相间间隔棒。考虑技术和经济性指标要求，在实际工程应用中，应考虑差异化设计准则，合理的进行分析，设计出满足不同实际线路要求的间隔棒布置方案。

根据 750kV 紧凑型输电线路的特点，结合防风偏/非同期摇摆特性的研究结论，利用组合风荷载模型，针对 300m、400m 和 500m 档距进行计算和分析，给出风偏/非同期摇摆时相间距随时间的变化曲线，以及不同情况下相间距最小值。通过分析可知，对于 300m 以下档距，由于风荷载合力较小，相应的导线风偏/非同期摇摆也较小，通常情况下，可考虑不安装相间间隔棒。对于档距小于 500m 的情况，可以根据不同的情况分别设置一根、两根和三根相间间隔棒：当安装设置一根时，建议通常安装在档距的中央；安装两根时，建议安装在档距左右约 1/3 处，并根据工程实际中子导线间隔棒的安装位置，使相间间隔棒安装在

距档中子导线间隔棒临近的两子导线间隔棒上，并进行相应的验算；安装三根时，考虑分别安装在档距的中央以及档距约 2/9 和 2/7 处。

根据以上分析，选择芯棒直径为 45mm 的相间间隔棒，利用组合风荷载模型，计算得到相间间隔棒数量、安装位置及对应的工频电压和操作过电压相间最小间隙值，如表 6 所示。

表 6 安装相间间隔棒后组合风模型时工频电压和操作过电压相间最小间隙 (m)

Tab.6 the minimum phase spacing of conductors at combination wind after the interphase spacers is settled

档距	相间间隔棒数量	安装位置	风速	档距中点相间距	档距 1/4 处相间距
300	1	中点	35	7.2425	6.6390
	1	中点	18	7.3634	6.9205
400	1	中点	35	5.7228	5.4994
	1	中点	18	7.1670	6.8753
500	3	*1	35	6.0548	6.1196
	2	*2		5.2999	5.3785
	3	*1	18	7.3997	7.2791
	2	*2		6.8691	6.9711

注 *1：相间间隔棒安装位置为-110、0、117 坐标处，*2：相间间隔棒位置安装为-78、78m 坐标处，弧垂最低点为坐标原点。

计算结果给出了两种不同工况下的相间距变化的最小值（分别是中点及左右 1/4 点），由表 6 可知，在档距为 300m 和 400m 时，在中点安装 1 支 45mm 直径相间间隔棒，即可满足工频电压和操作过电压相间空气间隙要求；在档距 500m 情况下，针对安装 2 支或 3 支 45mm 直径相间间隔棒的情况分别进行了分析，两种安装方式均能满足相间空气间隙要求，但安装 2 支时，其操作过电压最小间隙值已接近规范中 6.8m 的档中最小空气间隙值。

4 结论

750kV 线路所经走廊地形复杂，局部地区气候条件恶劣，在相间间隔棒的优化配置研究中，本文重点考虑了不同微地形、微气象条件下的风偏/非同期摇摆特性，基础开展了相间间隔棒布置方案关键技术研究。

(1) 建立了输电线路导线系统非线性静力学、动力学有限元模型，解决了输电线路导线自重垂度对导线张力的影响效应求解问题，并采用无条件 Newmark 方法结合荷载增量法，求解动力学方程，为 750kV 紧凑型输电线路风偏计算提供了理论基础。

(2) 结合气象观测数据及线路运行经验，建立了

稳定风+脉动风的风荷载模型,并在工频电压及操作过电压两种气象条件下,考虑导线弧垂和大变形等几何非线性因素,利用两种不同的风荷载模型对不同档距水平排列两相导线非同期摇摆动力特性进行研究,得到不同条件下相导线最小相间距值,为相间间隔棒的布置方式及其优化提供了理论依据。

(3) 针对不同档距情况,重点考虑了组合风荷载的计算模型,进行了理论分析和数值仿真,给出了750kV紧凑型输电线路非同期摇摆的防治的相间间隔棒优化配置方案。分析计算结果表明,组合风荷载模型计算结果与线路运行经验吻合,非同期摇摆闪络防治方案和措施可以明显降低相导线间放电故障的发生,为紧凑型输电线路的设计提供了理论依据。与稳态风荷载模型对比,组合风荷载模型的配置方案不但能保证线路的安全稳定运行,并能在保障线路安全稳定运行的情况下,合理减少相间间隔棒配置数量,降低线路工程造价。

(4) 由于风的随机性,其模拟需要和气象部门配合,进行大量的长期的气象观测资料收集,尤其是线路走廊附近,为进一步的有效风荷载模拟提供相关数据,以便建立更为切实可行、满足工程实际需要的力学模型。

致谢

感谢国家自然科学基金项目(50908218)的支持。

References (参考文献)

- [1] CHEN Zai-tie, FAN Qin-shan, WU Hong-yu. Nonlinear motion analysis on 500kV compact line conductor [J]. JOURNAL OF TSINGHUA UNIVERSITY(SCIENCE AND TECHNOLOGY), 1999, 9(12): 101~104
陈在铁, 范钦珊, 吴宏宇. 500kV紧凑型线路导线非线性运动分析[J]. 清华大学学报(自然科学版) 1999, 9(12): 101~104
- [2] Q/GDW 179-2008, Technical code for design 110~750kV overhead transmission line [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2008
Q/GDW 179-2008, 110~750kV架空送电线路设计技术规定 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2008
- [3] D L/T 5217, 2005, Technical code for design of 220kV~500kV compact overhead transmission line [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2005
D L/T 5217, 2005, 220kV~500kV紧凑型架空送电线路设计技术规定 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2005
- [4] LONG Li-hong, HU Yi, LI Jing-lu et al. Study on Windage Yaw Discharge of Transmission Line [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(4): 19-21
龙立宏, 胡毅, 李景禄等. 输电线路风偏放电的影响因素研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(4): 19-21
- [5] HU Yi, WANG Li-nong, SHAO Gui-wei, et al. Influence of Rain and Wind on Power Frequency Discharge Characteristic of Conductor-to-tower Air Gap [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(5): 845-850
胡毅, 王力农, 邵瑰玮. 风雨对导线—杆塔空气间隙工频放电特性的影响[J]. 高电压技术, 2008, 34(5): 845-850
- [6] ZHAO Gui-feng, XIE Qiang, LIANG Shu-guo. Wind Tunnel Test on Wind Resistant Design of High-voltage Transmission Tower-line Coupling System. [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(5): 1206-1213
赵桂峰, 谢强, 梁枢果. 高压输电塔线体系抗风设计风洞试验研究[J]. 高电压技术, 2009, 35(5): 1206-1213
- [7] LIU Guo-huan, LI Hong-nan. Analysis and Optimization Control of Wind-induced Dynamic Response for High-voltage Transmission Tower-line System [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(19): 131-137
柳国环, 李宏男. 高压输电塔—线体系风致动力响应分析与优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(19): 131-137
- [8] Liao Zong-gao, Zhang Hua, Chen Hai-bo. Inquisition into Valuing of Designed Wind Speed for EHV Transmission Lines [J]. ELECTRIC POWER CONSTRUCTION, 2006, 27(4): 28-32
廖宗高, 张华, 陈海波. 特高压输电线路设计风速取值的探讨[J]. 电力建设, 2006, 27(4): 28-32
- [9] ZHANG Yong. Status quo of wind hazard prevention for transmission lines and countermeasures [J]. EAST CHINA ELECTRIC POWER, 2006, 34(3): 28-31
张勇. 输电线路风灾防御的现状与对策[J]. 华东电力, 2006, 34(3): 28-31
- [10] LI Hong-nan, REN Yue-ming, Bai Hai-feng. Rain-wind-induced Dynamic Model for Transmission Tower System. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(30): 43-48
李宏男, 任月明, 白海峰. 输电塔体系风雨激励的动力分析模型[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(30): 43-48
- [11] D Burton, D Q Cao, R W Tucker, C Wang. On the stability of stay cables under light wind and rain conditions [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 279: 89-117
- [12] F Cluni, V Gusella, F Ubertini. A parametric investigation of wind-induced cable fatigue [J]. Engineering Structures, 2007, 29: 3094-3105
- [13] R C Battista, R S Rodrigues, M S Pfeil. Dynamic behavior and stability of transmission line towers under wind forces [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91: 1051-1067.
- [14] G. Bartoli, F. Cluni, V. Gusella, et al. Dynamics of cable under wind action: Wind tunnel experimental analysis [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2006, 94: 259-273
- [15] S H Cheng, G L Laroseb, M G Savage, et al. Experimental study on the wind-induced vibration of a dry inclined cable-Part I: Phenomena [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96: 2231-2253
- [16] S H Cheng, P A Irwin, H Tanaka. Experimental study on the wind-induced vibration of a dry inclined cable-Part II: Proposed mechanisms [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96: 2254-2272
- [17] M J Paluch, T T O Cappellari, J D Riera. Experimental and numerical assessment of EPS wind action on long span transmission line conductors [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95: 473-492
- [18] Schaumann P, WilkeFourth F. Current developments of support structures for wind turbines in offshore environment[C]. International Conference on Advances in Steel Structures, Shanghai, China, 2005.
- [19] LIU Xi-liang, ZHOU Ying. Numerical Simulation Methods of Wind Load [J]. Industrial Construction, 2005, 35(5): 81-84
刘锡良, 周颖. 风荷载的几种模拟方法[J]. 工业建筑, 2005, 35(5): 81-84.