

特高压换流站内电压变送器中 铁磁材料励磁曲线拟合方法研究

叶有名¹,唐 明²,张 华²,陈 刚²

(1. 国网四川省电力公司,四川 成都 610041;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610072)

摘 要:研究了特高压换流站中由交直流耦合引发的铁磁谐振过电压问题,针对套管末屏测量单元中电压变送器的励磁曲线特性,分析了奇次多项式拟合与正切函数拟合的特点。利用泰勒公式与伯努利函数等数学工具论证了二者的拟合特具有内在统一性,为铁磁谐振非线性方程的各种解析解和数值提供了理论支撑。

关键词:特高压;铁磁谐振;伯努利函数

Abstract:Ferroresonance over – voltage caused by coupling of AC and DC system in ultra – high voltage (UHV) converter station is studied. Based on the excitation curve in voltage transformer unit, both characteristics of odd order polynomial fitting and tangent function fitting are analyzed and compared. Taylor’s formula and Bernoulli function are induced to prove the unity of both fitting methods, which provides a theoretical foundation for analytic solution and numerical solution.

Key words:ultra – high voltage; ferroresonance; Bernoulli function

中图分类号:TM713 文献标志码:A 文章编号:1003 – 6954(2017)02 – 0001 – 03

0 引 言

随着中国西部大开发战略以及新能源战略的扎实推进和不断深入,“十三五”末四川电网水电外送能力预计超过 60 GW,其中通过超特高压直流输电工程外送的电力接近 50 GW,占到总外送能力的 80% 左右。在此期间,西南 + 两华异步电网格局也将逐步形成,以四川为中心的西南电网特性将发生巨大改变,直流输电运行特性及其扰动的实时控制、响应特性将对电网运行产生越来越显著的影响。预计至 2025 年,四川电网内可能将再建 10 条以上的直流输电工程,直流输电系统运行性能和可靠性将对四川电网和交直流混联电网安全运行起到至关重要的作用。

虽然中国在特高压直流输电技术领域已经达到国际领先水平,但近年来的特高压运维经验表明,在直流输电的诸多细节方面仍有大量的研究工作有待深入开展。其中,交流系统和直流系统之间的耦合以及引发的铁磁谐振过电压问题尤为突出,其电磁暂态过程机理复杂,对特高压直流输电工程的安全

稳定运行构成很大威胁。

在铁磁谐振领域,人们做了大量的研究,但由于铁磁谐振问题理论上属于高阶非线性系统^[1],无法得到数学上的解析解,因此对问题的本质还未完全搞清楚。大量的试验研究和运行均表明,实际的谐振情况十分复杂,可能存在基频、高频和分频谐振甚至混沌等不同的谐振状态^[2],因此长期以来铁磁谐振一直是内部过电压的理论难题和实际难题。

在理论分析上,主要有图解法、相平面法、谐波平衡法、描述函数法等^[3-5]。在数值计算和仿真分析方面,用给定参数进行计算得出有关谐振的规律,或者是采用电力系统电磁暂态计算程序对实际系统进行建模仿真计算。

20 世纪 80 年代后期,学者们又将铁磁谐振与非线性动态系统和混沌分析结合起来^[6],将分叉理论、奇异和非奇异吸引子的概念引入铁磁谐振的研究领域^[7],利用功率谱密度和庞加莱映射等方法对其进行动态分析^[8]。

但无论是求近似解析解还是数值解,励磁曲线的获取和精确拟合是最核心的问题。在忽略磁滞和涡流的前提下,常见的励磁曲线拟合方法有奇次多

项式拟合与反正切函数拟合等方法。这里重点研究这两种拟合方法各自的特点,并论证二者在数学本质上的统一性。

1 换流变压器套管末屏铁磁谐振的非线性方程

特高压换流站换流变压器套管末屏分压器是监测阀侧绕组电压的重要节点,其所采用的电容分压原理与后续电压采集单元构成了典型的 CVT 结构。为方便研究,可以采用戴维南定理将其等效转化成如图 1 所示的 RLC 串联电路。

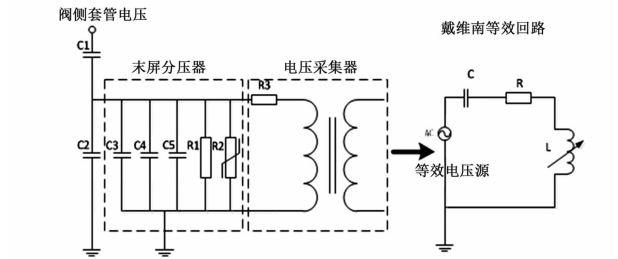


图 1 末屏分压器的戴维南等效电路图

该等效电路为一典型的串联 RLC 电路,其回路电压方程为

$$E = \frac{1}{C} \int i \, dt + Ri + \frac{d\varphi}{dt} \tag{1}$$

式中: E 为等效电压源电动势; i 为回路中的电流; R 为串联电阻; C 为等效电容; φ 为铁心主磁链。

将 $i = f(\varphi)$ 代入末屏分压器回路电磁方程中可得

$$E = \frac{1}{C} \int f(\varphi) \, dt + Rf(\varphi) + \frac{d\varphi}{dt} \tag{2}$$

取 $E = E_m \sin(\omega t)$, 对式(2)两边求导可得

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + Rf^{(1)}(\varphi) \frac{d\varphi}{dt} + \frac{1}{C}f(\varphi) = \omega E_m \cos(\omega t) \tag{3}$$

式(3)是二阶非线性方程,且带有恒频恒幅激励项。结合实际励磁曲线进行拟合之后,可以方便地得到 $f(\varphi)$ 中各多项式的系数。但即便如此,该方程也无法得到解析解。在不同的参数下,结果可能存在周期响应、拟周期响应甚至混沌响应,且不同初始条件对解的形式影响很大。

2 励磁曲线拟合方法的统一性证明

在考虑铁心的饱和之后,其磁链和励磁电流之间不再是简单的线性关系,某特高压换流站中换流变压

器套管末屏电压采集器的励磁曲线如图 2 所示。

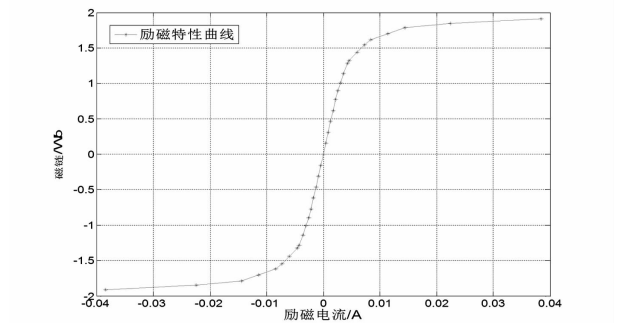


图 2 电压采集器的励磁曲线

不失一般性,定义电流和磁链之间的关系为

$$i = f(\varphi) \tag{4}$$

在铁磁谐振的众多文献研究中,对电流和磁链的关系多采用奇次多项式进行拟合,例如: $i = a_1 \varphi + a_3 \varphi^3$ 、 $i = a_1 \varphi + a_5 \varphi^5$ 、 $i = a_1 \varphi + a_7 \varphi^7$ 、 $i = a_1 \varphi + a_3 \varphi^3 + a_5 \varphi^5$ 等等;也有部分文献采用正切函数对励磁特性曲线进行拟合: $i = K_1 \tan \frac{\varphi}{K_2}$ 。那么,对于一般铁磁材料的励磁特性曲线,到底该采用哪种函数进行拟合,以下进行简单的探讨。

在不考虑磁滞、涡流的情况下,铁磁材料的励磁曲线 $i = f(\varphi)$ 是一条过原点的单调递增曲线,具有奇对称的性质,且满足狄利克雷条件。在 $(0,0)$ 点对其进行泰勒展开:

$$\begin{aligned} i = f(\varphi) &= f(0) + \frac{f^{(1)}(0)}{1!} \varphi + \frac{f^{(2)}(0)}{2!} \varphi^2 + \frac{f^{(3)}(0)}{3!} \varphi^3 + \\ &\dots + \frac{f^{(n)}(0)}{n!} \varphi^n + R_n(\varphi) \end{aligned} \tag{5}$$

式中, $R_n(\varphi)$ 为 φ^n 的高阶无穷小。

由 $i = f(\varphi)$ 的奇对称特性可知,其泰勒展开的无穷级数中只有 φ 的奇次幂而没有偶次幂,且 $f(0) = 0$, 因此 $i = f(\varphi)$ 的泰勒级数展开可以化简为

$$i = f(\varphi) = \sum_{k=0}^n \frac{f^{(2k+1)}(0)}{(2k+1)!} \varphi^{2k+1} \tag{6}$$

因此,对于 $i = a_1 \varphi + a_3 \varphi^3$ 、 $i = a_1 \varphi + a_5 \varphi^5$ 、 $i = a_1 \varphi + a_7 \varphi^7$ 、 $i = a_1 \varphi + a_3 \varphi^3 + a_5 \varphi^5$ 等拟合方法,均是励磁曲线 $i = f(\varphi)$ 在某种程度上的截断和近似,其精度仅在某些范围内满足工程要求。

对于采用正切函数拟合方法 $i = K_1 \tan \frac{\varphi}{K_2}$, 其拟合精度明显高于 $i = a_1 \varphi + a_3 \varphi^3$ 、 $i = a_1 \varphi + a_5 \varphi^5$ 、 $i = a_1 \varphi + a_7 \varphi^7$ 、 $i = a_1 \varphi + a_3 \varphi^3 + a_5 \varphi^5$ 等奇次多项式,这

是因为正切函数本身的泰勒级数展开即为奇次多项式的加权之和,证明如下。

正、余弦函数的麦克劳林级数为

$$\sin\varphi=\varphi-\frac{\varphi^3}{3!}+\frac{\varphi^5}{5!}+\cdots+(-1)^{n-1}\frac{\varphi^{2n-1}}{(2n-1)!}+R_{2n-1}(\varphi)$$
$$\cos\varphi=1-\frac{\varphi^2}{2!}+\frac{\varphi^4}{4!}+\cdots+(-1)^n\frac{\varphi^{2n}}{(2n)!}+R_{2n}(\varphi)$$

式中, $R_{2n}(\varphi)$ 为 φ^n 的高阶无穷小。
则正切函数泰勒展开可以由式(9)计算:

$$\tan\varphi=\frac{\sin\varphi}{\cos\varphi}=\frac{\varphi-\frac{\varphi^3}{3!}+\frac{\varphi^5}{5!}+\cdots+(-1)^{n-1}\frac{\varphi^{2n-1}}{(2n-1)!}+R_{2n-1}(\varphi)}{1-\frac{\varphi^2}{2!}+\frac{\varphi^4}{4!}+\cdots+(-1)^n\frac{\varphi^{2n}}{(2n)!}+R_{2n}(\varphi)}$$

采用多项式相除常见的“长除法”,对式(9)进行化简可得

$$\tan\varphi=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-1)^{n-1}4^n(4^n-1)B_{2n}\varphi^{2n-1}}{(2n)!}$$

式中, B_n 为 n 次伯努利数,可以通过递推公式进行计算。

$$\sum_{k=0}^nC_n^kB_k=B_n(n=2,3,\cdots)$$

于是正切函数的泰勒展开可以表达为

$$\tan\varphi=\varphi+\frac{\varphi^3}{3}+\frac{2\varphi^5}{15}+\frac{17\varphi^7}{315}+\cdots,|\varphi|<\frac{\pi}{2}$$

由上面推导可见, $\tan\varphi$ 函数其本身的泰勒展开即为无穷项奇次幂多项式的加权之和,用其对励磁曲线进行拟合在精度上必然要高于有限项奇次多项式的拟合结果,这是由正切函数本身的性质所决定。

上述结果表明,励磁特性曲线 $i=f(\varphi)$ 为一满足狄利克雷条件的单调递增奇函数,因此可以展开为奇次幂多项式无穷级数的加权之和。各类文献中关于 $i=f(\varphi)$ 函数关系式的各种拟合方法具有内在的统一性,均是奇次幂多项式的叠加。但采用正切函数进行拟合时,由于其本身就是奇次幂多项式的无穷级数之和,因此拟合效果会明显优于有限项多

项式的拟合效果。

3 总 结

特高压换流站中由交直流系统间的耦合而引发的铁磁谐振过电压问题尚不多见。由于铁磁材料的饱和特性所引进的非线性特点,以至于无法得到解析解,在求取其数值解的时候,对励磁曲线的近似拟合十分关键。

前面探讨了常见的两种拟合方法,并通过泰勒公式和伯努利函数等数学工具论证了两种拟合方法在本质上是一致的。可以认为,采用有限项多项式对励磁曲线进行拟合是采用正切函数进行拟合的子集。从励磁特性曲线本身的泰勒展开表达式上讲,两类方法具有高度的统一性。

参考文献

[1] 杨鸣. 铁磁谐振过电压非线性特性及其柔性抑制策略研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.

[2] 刘凡. 中性点直接接地系统铁磁谐振过电压的混沌特性与控制检测方法[D]. 重庆:重庆大学,2006.

[3] 李俊. 500 kV CVT 铁磁谐振问题研究[J]. 电测与仪表,2010,47(7A):65-68.

[4] 张业. 电力系统铁磁谐振过电压研究[D]. 成都:西南交通大学,2008.

[5] 秦祖泽,黄绍平. 电容式电压互感器分频铁磁谐振新的分析方法[J]. 高压电器,1997(4):19-22.

[6] 王世凯. 小电流接地电力系统铁磁谐振消谐装置的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学,2007.

[7] 张博,鲁铁成,杜晓磊. 中性点接地系统铁磁谐振非线性动力学分析[J]. 高电压技术,2007,33(1):31-35.

[8] 黄治国,雷红才,苗青,等. 电容式电压互感器分频谐振的分析与对策[J]. 高电压工程,2004,30(7):58-59.

作者简介:

叶有名(1972),硕士、高级工程师,研究方向为电力系统自动化、高压直流输电。

唐 明(1986),博士、工程师,主要从事电力系统稳定分析与控制的研究。

(收稿日期:2016-11-08)

国家电网公司面向社会各界征集新技术

国家电网公司贯彻落实国家创新驱动发展战略,致力于推动电力新技术在电网建设、生产、运营中的推广应用工作。现诚邀社会各界通过新技术征集平台(国家电网公司电子商务平台 <http://ecp.sgcc.com.cn>)开展新技术申报工作。

重冰区特高压直流线路大截面多分裂导线选型研究

周 唯,刘翰柱,谢 静,梁 明
(西南电力设计院有限公司,四川 成都 610021)

摘 要:选择特高压直流输电线路工程的典型重冰区段为边界条件,并根据系统规划要求,开展大截面导线的电气性能、机械特性和全寿命周期经济性的比较分析。研究表明,大截面导线均能满足机械特性的校核要求,但随着冰区量级增大,年费用最优的推荐导线总截面呈减少趋势。损耗小时数越低,减少分裂和减小截面的导线方案年费用优势越明显。

关键词:特高压;直流输电线路;重冰区;导线

Abstract: Taking the typical heavy icing section of UHVDC transmission line as boundary conditions and according to the requirements of system planning, the electrical performance, mechanical characteristic and life cycle economy of large section conductors are compared and analyzed. Research shows that large section conductors can meet the requirements of mechanical characteristics. And the annual cost of total cross section of the optimal recommended conductor shows a decreasing trend with the increase of ice. If the loss hours are lower, the advantage of annual cost of conductor plan with lowering the number of bundled conductor and reducing cross section is more obvious.

Key words: ultra - high voltage (UHV); DC transmission lines; heavy icing area; conductor

中图分类号:TM713 文献标志码:A 文章编号:1003 - 6954(2017)02 - 0004 - 07

0 引 言

特高压直流线路架线工程投资一般占本体投资的30%左右,再加上导线方案变化引起的杆塔和基础工程量的变化,其对整个工程的造价影响是极其巨大的,直接关系到整个线路工程的建设费用以及建成后的技术特性和运行成本,所以在整个输电线路的技术经济比较中,应该对导线的截面和分裂型式进行充分的技术经济比较,推荐出满足技术要求而且经济合理的导线截面和分裂型式。

随着中国多条特高压直流输电线路工程建设投运,同时开展了900 mm²、1 000 mm²、1 250 mm²等大截面导线研制及工程应用研究。从荷载方面来看,分裂根数越少,导线截面越大,导线抗冰能力越强,杆塔荷载也随之显著减少。下面针对±800 kV直流线路工程输送容量增大、投资更高的特点,开展导线减少分裂数和缩截面研究;并提出满足工程要求的设计技术方案,为后续工程的重冰区大截面导线选型积累经验。

1 导线选型边界条件

- 1.1 系统边界条件
- 系统标称电压:±800 kV;系统输送功率:10 000 MW;额定电流:6 250 A。地形条件:20%高山大岭、40%山地、30%丘陵、10%平地。气象条件组合:27 m/s 风区、20 mm 冰区;27 m/s 风区、30 mm 冰区;27 m/s 风区、40 mm 冰区。
- 1.2 导线选择控制参数
- 特高压直流输电线路导线选型,是根据系统需要,按照经济电流密度和系统输送容量,结合不同导线的材料结构进行电气和机械特性等比选,并应满足可听噪声和无线电干扰等技术条件的要求,通过年费用最小法进行综合技术经济比较后确定特高压直流输电线路的导线截面和分裂型式。
- 1.2.1 导线选型规范要求
- 根据GB 50790 - 2013《±800 kV 直流架空输电线路设计规范》规定:±800 kV 直流线路下方最大地面合成场强的控制指标为30 kV/m;邻近民房的最大合成场强的控制指标为25 kV/m;无线电干扰

表 1 机械特性比较表

导线型号	铝/钢股数	总截面 /mm ²	直径 /mm	线重 /(kg · m ⁻¹)	拉断力 /kN	弹性 模量 /MPa	热膨胀 系数/ × 10 ⁻⁶ (1/℃)	20℃ 时直流 电阻/ (Ω · km ⁻¹)
JL/G2A - 1 000/80	84 × 3. 89/19 × 2. 34	1 080. 00	42. 79	3 411. 00	255 330	65 200	20. 5	0. 028 76
JL/G2A - 1 120/90	84 × 4. 12/19 × 2. 47	1 211. 00	45. 30	3 811. 50	295 940	65 200	20. 5	0. 025 80
JL/G2A - 1250/100	84 × 4. 35/19 × 2. 61	1 350. 03	47. 85	4 252. 30	329 850	65 200	20. 5	0. 023 00
JLHA1/G2A - 1 250/100	84 × 4. 35/19 × 2. 61	1 350. 04	47. 85	4 252. 30	523 360	65 200	20. 5	0. 026 90
JLHA4/G2A - 1 250/100	84 × 4. 35/19 × 2. 61	1 350. 04	47. 85	4 252. 30	448 460	65 200	20. 5	0. 024 80
JLHA4/G2A - 1 120/90	84 × 4. 12/19 × 2. 47	1 211. 00	45. 30	3 811. 50	402 100	65 200	20. 5	0. 027 66
JLHA4/G2A - 1 000/80	84 × 3. 9/19 × 2. 34	1 085. 17	42. 90	3 418. 04	355 450	65 200	20. 5	0. 033 51

限值一般地区不超过 58 dB (μV/m)。可听噪声限值:海拔 1 000 m 及以下地区不超过 45 dB (A) ;海拔高度大于 1 000 m 地区控制在 50 dB (A) 以下。验算覆冰气象条件时,弧垂最低点的最大张力不超过拉断力的 60% ,悬挂点的最大张力不超过拉断力的 66% [1]。

1.2.2 重冰区导线选型要求

重冰区线路导线须满足设计规范提出的电磁环境控制限值要求,同时还应考虑机械特性满足以下原则:不能制约整条线路的传输能力;要有较高的机械强度和过载能力;铝股在冰荷载下的安全系数要高,以防止重冰区线路过载时断股;弧垂特性优良,降低杆塔高度,并满足电磁环境参数要求。

2 导线类型及分裂间距选择

2.1 导线类型选择

在进行导线型号的选取时,首先应立足于国内已有成功制造、施工和运行经验的导线型式。根据导线制造标准 GB/T 1179 - 2008《圆线同心绞架空导线》,并参考国际上常用的导线标准[2],现初步选定表 1 所列 7 种常规导线型号作为比较用。

参比导线的型号及特性见表 1。

2.2 分裂间距选择

从电气方面看,导线存在最佳分裂间距,使得表面电场强度最小,但根据计算分析,限制次档距振荡要求的分裂间距才是控制条件。次档距振荡是由迎风侧子导线的尾流所诱发的背风侧子导线的不稳定振动现象。一般认为分裂导线间保持足够的距离就可以避免出现次档距振荡现象。根据国外研究,当分裂间距与子导线直径之比 $S/d > (16 \sim 18)$ 时,就

可以避免出现次档距振荡。

特高压线路由于分裂根数的增加,在采用大截面导线时,很难保证 $S/d > (16 \sim 18)$ 。但根据国外线路设计和运行的情况分析, S/d 的比值在 10 ~ 18 之间也能满足线路的安全运行。根据上述情况,结合中国超高压线路的设计、运行经验及本工程电磁环境计算结果, S/d 值暂按不小于 10 控制,工程具体实施时,进一步优化间隔棒布置方案,以抑制导线的次档距振荡等问题[3]。根据国内外已建工程情况和有关研究成果,推荐特高压直流线路 1 250 mm² 截面导线分裂间距按表 2 选取。

表 2 导线分裂间距及 S/d 值一览表

分裂根数	分裂间距 S/mm	分裂导线圆直径 D/mm	S/d
6	500	1 000	10. 440 ~ 11. 680
8	550	1 100	11. 484 ~ 12. 850

注:d 为子导线直径,mm。

3 电气特性

3.1 导线总截面的选取

目前在建的锡盟—江苏、上海庙—山东 ± 800 kV 直流输电线路工程的输送容量均按双极输送容量 10 000 MW 进行设计。鉴于 ± 800 kV 直流输电线路的发展趋势,按系统输送容量 10 000 MW 开展导线选型,由此算得每极电流为 6 250 A,按电流密度不大于 0. 9 A/mm² 考虑,则导线总铝截面不小于 7 000 mm²。

3.2 导线表面电场强度

一般认为直流线路导线起晕场强和交流线路起晕场强的峰值相同,可以将皮克(peek)公式转换为

直流型式,计算各种导线在海拔 1 000、2 000、3 000、3 500 m 时的起始电晕电场强度见表 3。

表 3 导线起始电晕电场强度 E_0 表(晴天)

导 线	起晕电场 $E_0/(kV \cdot cm^{-1})$			
	1 000 m	2 000 m	3 000 m	3 500 m
6×JL/G2A-1 250/100	16.24	14.86	13.55	12.94
8×JL/G2A-1 250/100	16.24	14.86	13.55	12.94
8×JL/G2A-1 000/80	16.40	15.01	13.70	13.08
8×JL/G2A-1 120/90	16.32	14.93	13.62	13.01
6×JLHA1/G2A-1 250/100	16.24	14.86	13.55	12.94
6×JLHA4/G2A-1 250/100	16.24	14.86	13.55	12.94
6×JLHA4/G2A-1 120/90	16.32	14.93	13.62	13.01
6×JLHA4/G2A-1 000/80	16.40	15.01	13.70	13.08

按经典公式校核导线表面平均最大电场强度,由于比选导线直径很大,极导线方案的表面最大电场强度均小于起始电晕电场强度 E_0 ,即在大部分时间内,导线不处于电晕状态。

3.3 无线电干扰

GB 50790-2013《±800 kV 直流架空输电线路设计规范》推荐的无线电干扰场强的经验公式和国际无线电干扰特别委员会 CISPR 的公式是一致的。这里采用 CISPR 公式进行无线电干扰场强的预估计算。各种极导线组合方案的无线电干扰计算结果见表 4。

表 4 导线无线电干扰计算结果 单位: dB(1μV/m)

导线方案	海拔	海拔	海拔	海拔
	1 000 m	2 000 m	3 000 m	3 500 m
6×JL/G2A-1 250/100	49.08	52.41	55.75	57.41
8×JL/G2A-1 250/100	44.79	48.12	51.46	53.12
8×JL/G2A-1 000/80	44.72	48.05	51.39	53.05
8×JL/G2A-1 120/90	44.73	48.06	51.39	53.06
6×JLHA1/G2A-1 250/100	49.08	52.41	55.75	57.41
6×JLHA4/G2A-1 250/100	49.08	52.41	55.75	57.41
6×JLHA4/G2A-1 120/90	48.96	52.29	55.62	57.29
6×JLHA4/G2A-1 000/80	48.94	52.27	55.61	57.27

注:表中为采用极间距 20 m,导线对地高度 23 m 的计算值。

可见,在海拔 3 500 m 时,各比选导线方案的无线电干扰均满足 58 dB(μV/m)的限值要求。总体来看,对于上述导线方案,无线电干扰不作为电磁环境的控制条件。

3.4 可听噪声

GB 50790-2013《±800 kV 直流架空输电线路设计规范》推荐采用 BPA 及 EPRI 的两种计算公式,这里采用 EPRI 计算公式。

各种极导线组合方案 and 不同海拔下的可听噪声值见表 5。

表 5 导线可听噪声计算表格 单位: dB(A)

导线方案	海拔	海拔	海拔	海拔
	1 000 m	2 000 m	3 000 m	3 500 m
6×JL/G2A-1 250/100	39.64	42.98	46.31	47.98
8×JL/G2A-1 250/100	35.91	39.24	42.57	44.24
8×JL/G2A-1 000/80	37.18	40.51	43.84	45.51
8×JL/G2A-1 120/90	36.52	39.85	43.19	44.85
6×JLHA1/G2A-1 250/100	39.64	42.98	46.31	47.98
6×JLHA4/G2A-1 250/100	39.64	42.98	46.31	47.98
6×JLHA4/G2A-1 120/90	40.86	44.20	47.55	49.20
6×JLHA4/G2A-1 000/80	42.18	45.52	48.85	49.52

注:导线平均高度 23 m,极间距 20 m。

由以上比较可看出,在海拔 1 000 m 时,所选参比导线均满足 45 dB(A)的限值要求;在海拔达到 3 500 m 时,可听噪声均满足 50 dB(A)的限值要求。通过电气特性计算校核,参选导线方案均满足电磁环境的控制条件。

4 20 mm 重冰区导线选型

根据系统输送容量 10 000 MW 开展导线选型,由此算得每极电流为 6 250 A,按电流密度不大于 0.9 A/mm² 考虑,则导线总铝截面不小于 7 000 mm²。10 mm 轻冰区和 15 mm 中冰区导线通过年费用最小法进行综合技术经济比较,推荐年费用最低的 8×JL/G2A-1 250/100 钢芯铝绞线导线方案,分析过程这里不作详细阐述。主要针对 20 mm、30 mm 重冰区导线进行比选。

4.1 20 mm 冰区机械特性

参与比选的各导线弧垂、过载能力详见表 6。导线荷载的比较详见表 7。

表 6 导线弧垂、过载性能一览表

导线型号	最大应力 安全系数	最大应力 (×10 MPa)	年均应力 (×10 MPa)	过载能力/mm <i>Lo</i> = 400	高温弧垂/m <i>Lo</i> = 400
6 × JL/G2A - 1 250/100	2.5	9.468	5.917	37.86	13.569
6 × JL/G2A - 1 120/90	2.5	9.469	5.918	36.81	13.998
6 × JL/G2A - 1 000/80	2.5	9.161	5.726	35.50	15.051
8 × JL/G2A - 1 250/100	2.5	9.468	5.917	37.86	13.569
8 × JL/G2A - 1 120/90	2.5	9.469	5.918	36.81	13.998
8 × JL/G2A - 1 000/80	2.5	9.161	5.726	35.50	15.051

注:过载时,导线最低点的最大张力达到其计算拉断力 60% 时相应的计算覆冰厚度。

表 7 20 mm 冰区导线荷载一览表

导线型号	相导线垂直荷重 <i>Lo</i> = 600 m (kN/相)		相导线风荷重 <i>Lh</i> = 500 m (kN/相)		耐张绝缘子 串配置 /kN
	均温	覆冰	大风	覆冰	
6 × JL/G2A - 1 250/100	150.12	296.17	90.82	65.42	5 × 550
6 × JL/G2A - 1 120/90	134.56	275.67	85.98	63.52	4 × 550
6 × JL/G2A - 1 000/80	120.42	256.67	81.22	61.65	4 × 550
8 × JL/G2A - 1 250/100	200.16	394.90	121.10	87.23	6 × 550
8 × JL/G2A - 1 120/90	179.41	367.56	114.64	84.70	5 × 550
8 × JL/G2A - 1 000/80	160.56	342.23	108.29	82.20	5 × 550

表 6、表 7 的 20 mm 重冰区各导线方案的过载能力大于 35 mm,满足 20 mm 重冰区设计要求,且 6 分裂导线方案的杆塔荷重明显低于 8 分裂导线。

4.2 20 mm 冰区年费用比较

4.2.1 本体投资测算

按目前设计原则及假定工程边界条件,对 20 mm 冰区各导线方案的初期投资进行估算,详见表 8。

表 8 本体投资及投资差额比较表

序号	导线型号及分裂数	基准本体 投资 (万元/km)	与导线 1 差值 (万元/km)
1	6 × JL/G2A - 1 250/100	462.5	0
2	6 × JL/G2A - 1 120/90	430.6	-31.9
3	6 × JL/G2A - 1 000/80	401.0	-61.5
4	8 × JL/G2A - 1 250/100	574.9	112.4
5	8 × JL/G2A - 1 120/90	532.1	69.6
6	8 × JL/G2A - 1 000/80	495.9	33.4

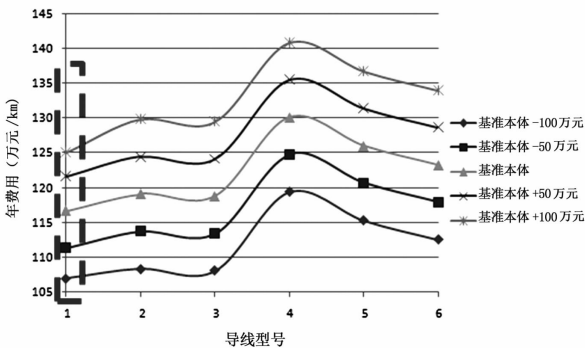
注:本体投资由选取 27 m/s 风区、20 mm 冰区气象条件的典型区段进行估算得来。

从表 8 各种导线方案每公里本体投资比较看出,6 分裂导线方案由于导线材料量、杆塔荷载小、塔重轻等原因,本体投资均小于 8 分裂导线方案,并

且截面越小,初期本体投资越低。

4.2.2 年费用比较分析

虽然 6 分裂导线方案初期投资较优,但是导线总截面较小,电能损耗较高。对于特高压直流长距离大负荷运行而言,随着损耗时间和运行时间的累积,电能损耗引起的投资流失将逐级增大。考虑实际运行后的经济性采用年费用比较法,进一步分析 20 mm 冰区各导线方案的最优选型。

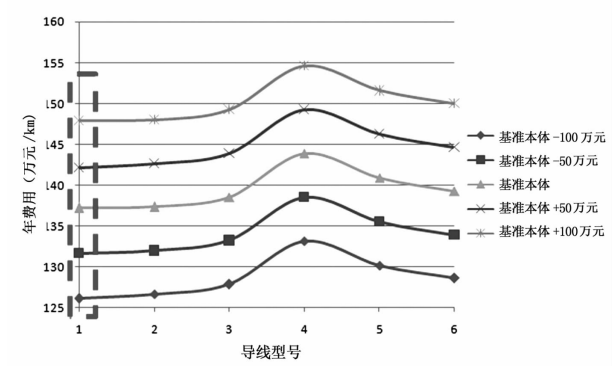


注:图中 1~6 号导线型号及基准本体详见表 8。

图 1 20 mm 不同本体投资水平下的导线年费用(3 000 h)

工程材料价格波动会影响本体投资的浮动,在此分析 20 mm 冰区不同本体投资水平下,各种导线方案的年费用对比情况。按照 20 mm 冰区各导线

方案的单公里本体投资(详见表8)作为基准本体进行比较测算。计算条件为:回收率8%;损耗小时数3 000 h;电价为0.4元/kWh。计算结果如图1所示。



注:图中1~6号导线型号详见表8,20 mm 基准本体462.5万元/km。

图2 20mm 不同本体投资水平下的导线年费用(4 000 h)

计算条件为:回收率8%;损耗小时数4 000 h;电价为0.4元/kWh。计算结果如图2所示。

根据图1~图3的各导线方案投资变化趋势比较结果可知,本体投资增减在-100万元~100万元的范围内,对不同电价及回收率进行了测算分析,20 mm 冰区年费用最低的导线为6×JL/G2A-1 250/100钢芯铝绞线方案。

通过上述方案比选,各种方案的导线弧垂特性和过载能力都能满足20mm重冰区的设计要求,从

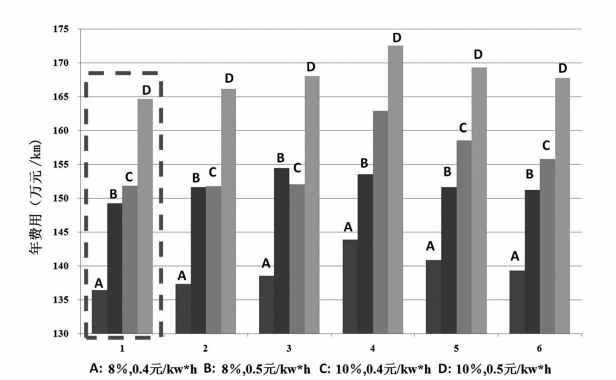


图3 20 mm 冰区不同电价及回收率的导线年费用

经济最优考虑,推荐6×JL/G2A-1250/100钢芯铝绞线作为20 mm 重冰区导线方案。

5 30 mm、40 mm 重冰区导线选型

5.1 30 mm、40 mm 重冰区机械特性

30 mm及以上重冰区线路运行经验表明,导线上主要发生悬垂线夹处的导线断股事故。因此在重冰区导线选择中应选取强度较大、铝股受力好的导线,并且适当提高导线安全系数,尽量降低铝股应力,提高线夹握力均匀性。根据重冰线路设计、运行经验,在30 mm及以上重冰线路,导线均采用钢芯铝合金绞线^[4]。参与比选的各导线弧垂、过载能力详见表9。

表9 导线弧垂、过载性能一览表

导线型号	最大应力 安全系数	最大应力 (×10 MPa)	年均应力 (×10 MPa)	过载能力/mm Lo=400	高温弧垂/m Lo=400
6×JLHA4/G2A-1 250/100	3.5	9.19	8.04	67.69	18.53
8×JLHA4/G2A-1 250/100	3.5	9.19	8.04	67.69	18.53
6×JLHA1/G2A-1 250/100	4.1	9.16	9.39	78.02	18.61
8×JLHA4/G2A-1 000/80	3.5	9.07	7.94	64.20	20.78
6×JLHA4/G2A-1 120/90	3.5	9.19	8.04	65.96	19.45
6×JLHA4/G2A-1 000/80	3.5	9.07	7.94	64.20	20.78

导线荷载的比较以40 mm冰区为例详见表10。

表10 40 mm 冰区导线荷载一览表

导线型号	相导线垂直荷重 Lo=500 m (kN/相)		相导线风荷重 Lh=400 m (kN/相)		耐张绝缘子串配置 /kN
	均温	覆冰	大风	覆冰	
6×JLHA4/G2A-1 250/100	200.16	565.91	98.09	171.34	5×550
8×JLHA4/G2A-1 250/100	150.12	424.43	73.57	128.51	6×550
6×JLHA1/G2A-1 250/100	160.89	504.65	87.94	163.48	5×550
8×JLHA4/G2A-1 000/80	134.56	400.35	69.65	125.46	5×550
6×JLHA4/G2A-1 120/90	120.67	378.49	65.96	122.60	4×550
6×JLHA4/G2A-1 000/80	160.56	359.34	108.29	98.64	4×550

通过表9、表10的30 mm、40 mm重冰区各导线方案的机械特性计算比选可见,大截面钢芯铝合金绞线过载能力大于60 mm,机械特性优秀,均能满足30 mm、40 mm重冰区设计要求,并留有较大裕度,故重冰区各导线方案长期运行的经济性将是导线方案的选型要点^[5]。

5.2 年费用比较

5.2.1 本体投资测算

由于30 mm、40 mm重冰区覆冰厚度的增加,造成铁塔荷载、基础作用力大幅增加,导线弧垂明显增大,杆塔平均档距更小,杆塔使用数量更多,使得工程材料量成倍数增加。由此引起单公里本体投资相对于20 mm冰区有大幅增长,势必影响导线选型趋势。按目前设计原则及假定工程边界条件,对30 mm、40 mm冰区各导线方案的初期投资进行估算,详见表11和表12。

表 11 30 mm 冰区本体投资及投资差额比较

序号	导线型号及分裂数	基准本体 投资 (万元/km)	与导线 1 差值 (万元/km)
1	6×JLHA4/G2A-1 250/100	1 086.5	0
2	8×JLHA4/G2A-1 250/100	1 424.3	337.8
3	6×JLHA1/G2A-1 250/100	1 083.3	-3.2
4	8×JLHA4/G2A-1 000/80	1 147.5	61.0
5	6×JLHA4/G2A-1 120/90	1 003.6	-82.9
6	6×JLHA4/G2A-1 000/80	911.2	-175.3

注:本体投资由选取 27 m/s 风区、30 mm 冰区气象条件的典型区段进行估算得来。

表 12 40 mm 冰区本体投资及投资差额比较

序号	导线型号及分裂数	基准本体 投资 (万元/km)	与导线 1 差值 (万元/km)
1	6×JLHA4/G2A-1 250/100	1 632.1	0
2	8×JLHA4/G2A-1 250/100	2 124.3	492.2
3	6×JLHA1/G2A-1 250/100	1 628.2	-3.9
4	8×JLHA4/G2A-1 000/80	1 683.7	51.6
5	6×JLHA4/G2A-1 120/90	1 484.4	-147.7
6	6×JLHA4/G2A-1 000/80	1 295.2	-336.9

注:本体投资由选取 27 m/s 风区、40 mm 冰区气象条件的典型区段进行估算得来。

通过表11和表12的典型区段投资估算比较可见,少分裂小截面导线仍然具有初期投资低的优点,需采用年费用比较法,进一步分析30mm、40mm冰

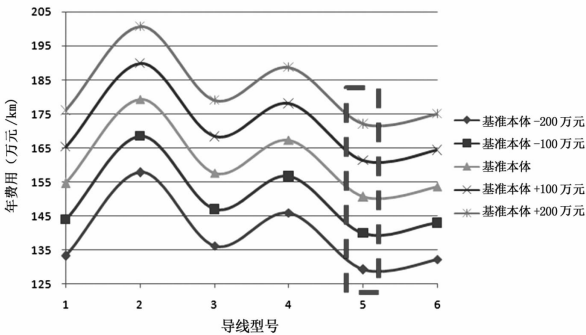
区各导线方案的综合经济性。

5.2.2 年费用比较分析

本体投资随着工程材料价格上下波动而变化,首先分析不同本体投资水平下,各种导线方案的年费用变化情况和差异性。

1)30 mm 冰区年费用比较

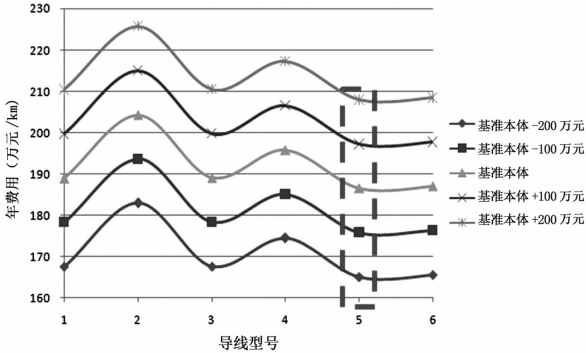
按照30 mm冰区各导线方案的单公里本体投资(详见表11)作为基准本体进行比较测算。计算条件为:回收率8%;损耗小时数3 000 h;电价为0.4元/kWh。计算结果如图4所示。



注:图中1~6号导线型号及基准本体详见表11

图 4 30 mm 不同本体投资水平下的导线年费用(3 000 h)

以40 mm冰区各导线方案的单公里本体投资(详见表12)作为基准本体进行比较测算。计算条件为:回收率8%;损耗小时数4 000 h;电价为0.4元/kWh。计算结果如图5所示。



注:图中1~6号导线型号及基准本体详见表12

图 5 30 mm 不同本体投资水平下的导线年费用(4 000 h)

从图4~图6的投资变化趋势比较可以看出,本体投资增减在-200万元~200万元的范围内。对不同电价及回收率进行了测算分析,30 mm冰区年费用最低的导线为6×JLHA4/G2A-1 120/90钢芯铝合金绞线。

2)40 mm 冰区年费用比较

分析40 mm冰区不同本体投资水平下各种导

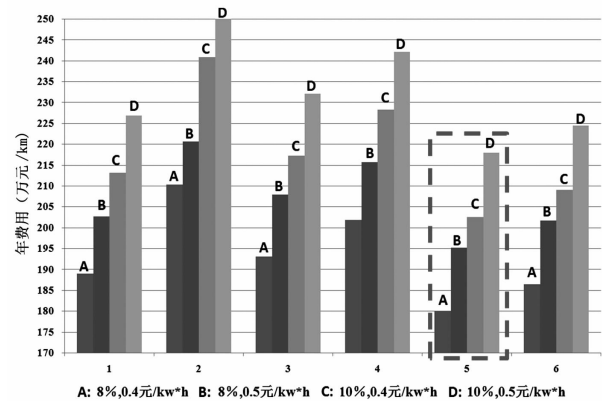
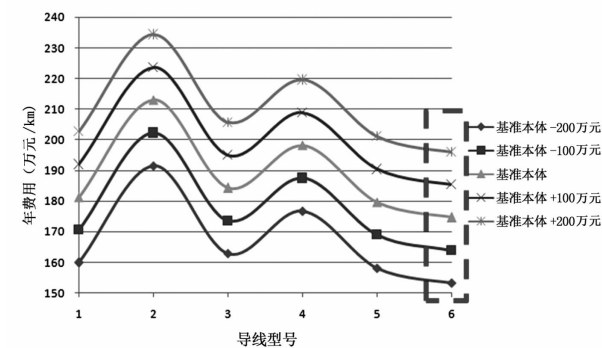


图 6 30 mm 冰区不同电价及回收率的导线年费用
线年费用对比情况。

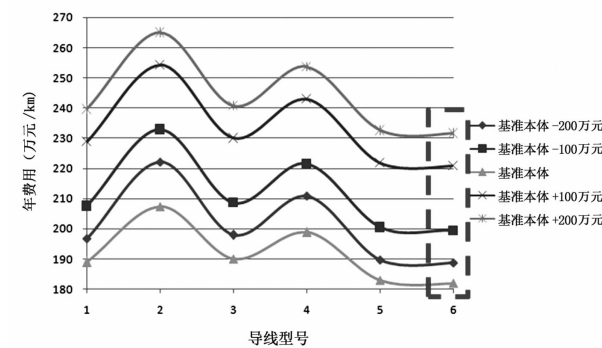
计算条件为:回收率 8%;损耗小时数 3 000 h;
电价为 0.4 元/kWh。计算结果如图 7 所示。



注:图中 1~6 号导线型号详见表 12,40 mm 基准本
体 1632.1 万元/km。

图 7 40 mm 不同本体投资水平下的导线年费用(3 000 h)

计算条件为:回收率 8%;损耗小时数 4 000 h;
电价为 0.4 元/kWh。计算结果如图 8 所示。



注:图中 1~6 号导线型号详见表 12,40 mm 基准本
体 1 632.1 万元/km。

图 8 40 mm 不同本体投资水平下的导线年费用(4 000 h)

从图 7~图 9 的投资变化趋势可见,本体投资增
减在 -200 万元~200 万元的范围内,对不同电价及
回收率进行了测算分析,40 mm 冰区年费用最低的导
线为 6×JLHA4/G2A-1 000/80 钢芯铝合金绞线。

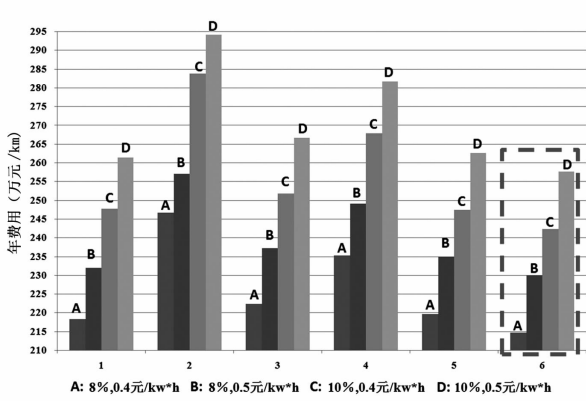


图 9 40 mm 冰区不同电价及回收率的导线年费用

通过上述方案比选,各种方案的导线弧垂特性
和过载能力都能满足 30 mm、40 mm 重冰区机械特
性的强度要求。通过年费用比较分析,在不同投资、
不同电价及回收率下,30 mm 冰区 6×JLHA4/G2A
-1 120/90 钢芯铝合金绞线最优,而 40 mm 冰区 6
×JLHA4/G2A-1 000/80 钢芯铝合金绞线最优。6
×JLHA4/G2A-1 120/90 钢芯铝合金绞线和 6×
JLHA4/G2A-1 000/80 钢芯铝合金绞线作为 30
mm、40 mm 重冰区的推荐导线方案。

6 结 论

- 1)在满足系统输送容量的前提下,各重冰区
推荐的大截面导线均能满足机械特性的校核要
求,随着冰区量级增大,年费用最优的推荐导线总
截面呈减少趋势。20 mm 冰区较 10 mm 和 15 mm
冰区减少了分裂数,30 mm 和 40 mm 冰区均减小
了导线截面。
- 2)对不同冰区 3 000 h、4 000 h 损耗的年费用
趋势进行比较,损耗小时数越低,减少分裂和减小截
面的导线方案年费用优势越明显。
- 3)大截面钢芯铝绞线已在特高压直流输电线路
设计中广泛应用,钢芯中强度铝合金绞线在节
约电能、减少损耗和降低年费用等方面具有显著
优势,在重冰区特高压直流输电线路中具有广泛
的应用前景^[6]。

参考文献

[1] GB 50790-2013, ±800 kV 直流架空输电线路设计规
范[S].

[2] GB/T 1179-2008, 圆线同心绞架空导线[S].

(下转第 23 页)

特高压直流故障对交流系统稳定性的影响分析

哈丽曼·合孜尔,樊艳芳

(新疆大学电气工程学院,新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要:基于 2016 年新疆特高压交直流混联送端电网不同的运行方式,仿真分析 ± 800 kV 特高压直流输电系统发生不同类型的故障时对哈密地区与近区交流系统电压的影响;并且针对不同的故障形式采取不同的控制策略,分析不同控制策略对于交直流混联系统运行电压的影响。研究表明,在直流系统发生故障时,从故障类型来看,直流单极闭锁故障时,富裕功率小,对系统稳定运行影响小;双极闭锁故障时,富裕功率大,从而引起沿线交流母线电压的降低,严重时则引起电压失稳,对系统稳定运行影响大;发生换相失败对系统暂态电压稳定性影响较大。随着直流外送功率的不断增大,无论是直流双极闭锁故障还是换相失败故障均会出现暂态电压升更加严重的局面。

关键词:特高压直流;直流闭锁;换相失败;稳控方案;电压影响

Abstract:Based on the different operation modes of Xinjiang UHV AC/DC hybrid sending grid in 2016, the influence of different failures occurring in ± 800 kV UHVDC transmission system on the voltage of AC system near the Kumul Prefecture is analyzed through simulation. Different control strategies are adopted according to different failure forms, and the influence of different control strategies on the operating voltage of AC/DC hybrid transmission system is analyzed. The research results are as follow: when DC system failure occurs, in view of different types of failures, DC monopole blocking results in low power surplus and a less influence on system operating stability; Bipolar blocking results in high power surplus which leads to the decrease of AC bus voltage along the line, even the voltage instability and a big influence on AC/DC hybrid transmission system. Commutation failure has a large effect on system transient voltage stability. With the constantly increase of DC power delivered to the outside, no matter DC bipolar blocking failure or the commutation failure, they all will lead to more serious transient voltage rise.

Key words:UHVDC; DC blocking; commutation failure; stability control scheme; voltage influence

中图分类号:TM712 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2017)02-0011-05

0 引 言

新疆电网随着 750 kV 交流外送第二通道和 ± 800 kV 哈密—郑州特高压直流工程的投运正式进入特高压“交、直流混联”大电网时代,其具有大功率外送、交流电网薄弱和交、直流混联等特点。由于系统特性比较弱,本身无法抵御“大电网”背景下特高压交、直混联系统的常见故障,故对新疆电网的安全稳定运行要求进一步提高。结合新疆电网自身的特点,深入分析并对新疆电网现有的相关送端电网切机的稳控措施进行全面优化,提高新疆外送能力,与此同时,保证新疆电网不同故障形式下送端电网的安全稳定运行^[1-5]。

目前,国内针对交直流混联系统常见故障对电网稳定性的影响和所采取的稳控方案有了初步的研

究。文献[6]中当新疆特高压直流输电系统发生双极闭锁故障时,提出协调优化切机不平衡量的稳控方案,几个方案相互之间做了比较。文献[7-9]分别分析了 ± 500 kV 林枫直流发生双极闭锁故障时对交流系统产生的冲击和 $\pm 1\,100$ kV 特高压直流对四川电网稳定性的影响,提出用稳控装置切机切负荷的稳控措施,从而减少直流闭锁故障对交流系统产生的冲击。文献[10-12]对于大规模“风火打捆”直流外送系统直流故障,提出了改变直流传输功率与调节风机的有功出力的方案来减少系统的不平衡功率。文献[13-15]提出了当特高压直流发生闭锁故障时,为了减少直流闭锁故障对交流冲击性影响,展开研究稳控方案,提出综合考虑直流送端系统火电,新能源的切机方案,提高系统的稳定性。

结合 2016 年新疆电网与西北主网不同的运行方式,仿真分析 ± 800 kV 特高压直流输电系统发生

不同故障时对哈密地区与近区交流系统电压的影响,提出切除直流配套电源及配合切除配套交流滤波器的稳控策略,对提高特高压交、直流混联系统的稳定运行具有一定的参考价值。

1 电网规模与运行方式

1.1 系统概况

根据新疆 750 kV 网架规划,东部环网建成,吐哈双线改接至天山换流站,新疆中部电网将通过 750 kV 吐天双线 + 哈塘双线共计 4 回线路同主网联络,新疆通过两条 750 kV 交流通道与西北电网联网,一条 ± 800 kV 天中直流与华中河南电网联网。特高压交、直流混联电网送端网架结构如图 1 所示。

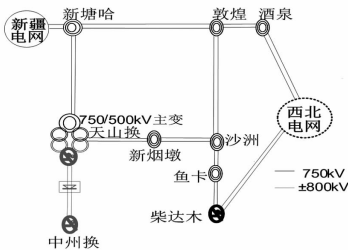


图 1 特高压交、直流混联电网送端网架结构

1.2 运行方式安排

根据新疆电网 2016 年运行方式,综合考虑 ± 800 kV 天中直流外送功率、直流配套电源的投运状况以及 750 kV 交流线路外送功率的实际情况,新疆交、直流送端电网有 3 种典型的运行方式,如表 1 所示。

表 1 新疆交直流送端电网运行方式

运行方式	直流送出功率/MW	直流配套电源/MW	交流线路外送功率/MW
方式 1	6 000	配套火电 6 台,400	250
方式 2	7 000	配套火电 8 台,500	250
方式 3	8 000	配套火电 10 台,600	250

2 电网安全稳定运行条件

根据中国《电力系统安全稳定导则》定义,结合新疆电网实际的输电特性和负荷特性,当系统满足:系统内中枢点电压不低于 $80\% U_n$,并且电压为减幅振荡,振荡逐步衰减消失;频率稳定即系统最低频率不应低至低频率减负荷装置最低频率轮频率值 (47.5 Hz);系统高频率时,高频率不应高于电网中

发电机组高频率保护最低频率整定值(一般应不高于 50.5 ~ 51 Hz);直流故障后 750 kV 联络线功率振荡呈衰减趋势,并最终趋于稳定。满足这些条件,认为系统稳定,否则认为系统不稳定。

电压要求:

- 1) ± 800 kV 天中直流 500 kV 母线电压故障后稳态电压不超过 550 kV;
- 2) 750 kV 稳态电压不超过 840 kV;暂态电压不超过 1.3 p. u. ;
- 3) 220 kV 稳态电压不超过 252 kV;暂态电压不超过 1.3 p. u. 。

3 特高压直流故障对送端交流系统的影响分析

3.1 直流单极闭锁故障

在 3 种方式下,天中直流发生单极闭锁故障时,系统的稳定计算结果如表 2 所示。由表 2 可知,直流发生单极闭锁故障时,方式 3 电压失稳,其他方式系统均能保持稳定。在不采取任何稳控措施的情况下,由于故障后直流输送功率下降,功率瞬间转移到送端交流电网,从而引起送端近区交流系统母线的暂态稳定电压上升,严重的甚至导致电压失稳。

表 2 直流单极闭锁故障计算结果

运行方式	稳定情况	暂态最大压升/kV
方式 1	稳定	23
方式 2	稳定	16
方式 3	失稳	电压失稳

直流单极闭锁故障后对系统不同运行方式采取不同的稳控措施。运行方式 1 采取切除 3 组 230 Mvar 滤波器及 1 组 270 Mvar 滤波器;运行方式 2 采取切除 3 组 230 Mvar 滤波器及 1 组 270 Mvar 滤波器;运行方式 3 采取切除直流配套电源 2 400 MW,1 组 270 Mvar 滤波器及 5 组 230 Mvar 滤波器。采取稳控措施后直流单极闭锁故障计算结果如表 3 所示。由表 3 可以看出,对不同运行方式采取相应稳控措施后,系统的暂态最大压升大幅减小,并且都在系统承受范围之内。

在运行方式 3 下单极闭锁后采取相应稳控措施,系统电压及频率如图 2 所示。由图 2 可知,直流单极闭锁故障后母线电压升高,当稳控装置动作切

表 3 采取稳控措施后直流单极闭锁故障计算结果

运行方式	稳定情况	暂态最大压升/kV
方式 1	稳定	8
方式 2	稳定	4
方式 3	稳定	3

除直流配套电源及配合切除交流滤波器后,750 kV 母线电压维持在 0.95 ~ 1.01 p. u. ,频率在合理范围之内。

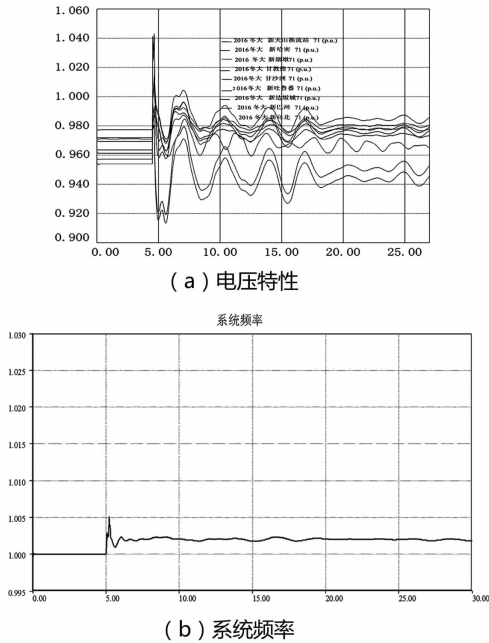


图 2 方式 3 下单极闭锁后系统电压及频率变化

3.2 直流双极闭锁故障

直流发生双极闭锁故障时,直流功率无法外送,此时送端电网将产生相当于故障前直流外送功率的电力盈余,大量的过剩功率将通过交流断面向东传送,造成输电通道上的输送功率急剧增加,从而引起沿线交流母线电压的降低,严重时则引起电压失稳。

在 3 种方式下,天中直流发生双极闭锁故障时,系统的计算结果如表 4 所示。由表 4 可以看出,直流发生双极闭锁故障时,在系统的 3 种运行下电压全失稳,进而引起系统运行失稳。

表 4 直流双极闭锁故障稳定计算结果

运行方式	稳定情况	表现形式
方式 1	失稳	电压失稳
方式 2	失稳	电压失稳
方式 3	失稳	电压失稳

直流双极闭锁故障后对系统不同运行方式采取不同的稳控措施。运行方式 1 采取切除配套电源总共 1 060 MW;运行方式 2 采取切除直流配套电

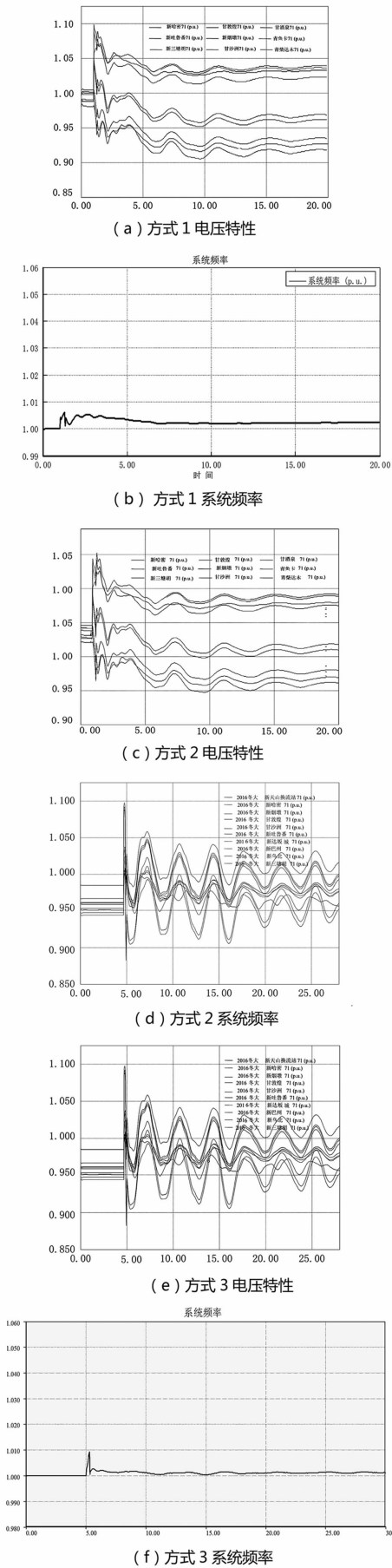


图 3 直流双极闭锁后系统电压及频率变化

源总共 2 160 MW;运行方式 3 采取切除直流配套电源总共 6 000 MW。采取稳控措施后直流双极闭锁故障计算结果如表 5 所示,系统的电压及频率如图 3 所示。由表 5 可知,采取相应的切除直流配套电源后系统运行均稳定。

表 5 直流双极闭锁故障稳定计算结果	
运行方式	稳定情况
方式 1	稳定
方式 2	稳定
方式 3	稳定

由图 3 可知,直流双极闭锁故障后 3 种运行方式下电压暂态压升都会剧增。当稳控装置动作切除直流配套电源后,由图 3(a)可知,在运行方式 1 下系统 750 kV 母线电压维持在 0.93 ~ 1.03 p. u.;由图 3(c)可知,在运行方式 2 下系统 750 kV 母线电压维持在 0.95 ~ 1.04 p. u.;由图 3(e)可知,运行方式 3 下 750 kV 母线电压维持在 0.93 ~ 1.06 p. u.。而由图 2(b)、(d)、(f)可知,在 3 种运行方式下,系统频率不超过 1.01 p. u.,在合理范围之内。

3.3 直流换相失败故障

特高压直流输电系统中换向失败是最常见的故障之一,伴随着交流电压的降低,直流电压也将会降低;同时直流功率随之交流电压逐渐降至 0,一旦交流系统短路故障切除,交流系统电压恢复,这时直流功率也慢慢恢复。

当交流系统短路故障导致换相失败时,系统 3 种运行方下 750 kV 和 220 kV 电压波动曲线如图 4 所示。

由图 4(a)、(b)可知,750 kV 暂态电压升高、降低较大的变电站是天山换流站,达到了 58 kV;220 kV 暂态电压较大的变电站是烟墩变电站,达到了 19.5 kV。由图 4(c)、(d)可知,750 kV 暂态电压升高、降低较大的变电站是天山换流站,达到了 65.1 kV;220 kV 暂态电压较大的变电站是烟墩变电站,达到了 20.8 kV。由图 4(e)、(f)可知,750 kV 暂态电压升高、降低较大的变电站是天山换流站,达到了 66.8 kV;220 kV 暂态电压较大的变电站是烟墩变电站,达到了 15.7 kV。直流换相失败以后稳态电压和暂态电压都在电压要求范围内。

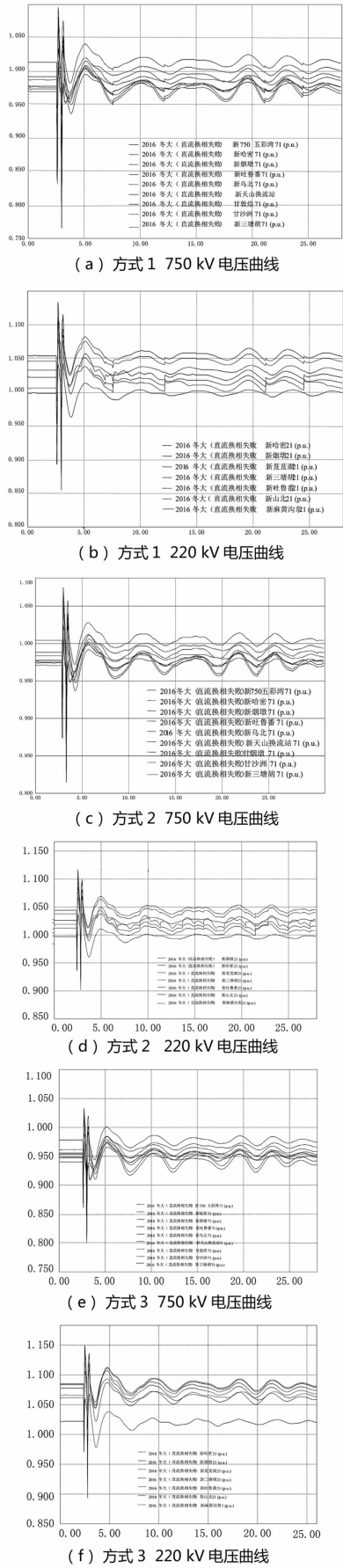


图 4 直流换相失败后 750 kV、220 kV 电压波动曲线

4 结 论

随着新疆电网特高压直流送电功率的增加,由直流闭锁等故障产生的富余功率也随之增加,这影响了新疆电网安全稳定运行,具体表现在:

1)在直流系统发生故障时,从故障类型来看,直流单极闭锁时,富余功率小,对系统稳定运行影响小。由于直流输送功率下降而引起近区交流系统母线的暂态稳定电压上升,双极闭锁时,富余功率大,故障后会导致系统失稳。采取相应的稳控策略(切除直流场滤波器及配套机组)后,可以使系统稳定。

2)随着直流外送功率的不断增长,直流闭锁故障均会出现暂态压升更加严重的局面,750 kV 层面暂态压升达到 80 kV 以上。应采取相应措施减少系统失稳概率。

3)直流系统发生换相失败对系统暂态电压稳定性影响较大,影响最大在方式 3 情况下,750 kV 暂态电压升高、降低较大的变电站是天山换流站,达到了 66.8 kV;220 kV 暂态电压较大的变电站是烟墩变电站,达到了 15.7kV。虽说直流系统发生换相失败对系统暂态电压影响大,但是故障以后 750 kV、220 kV 暂态电压和稳态电压都没超出电压要求范围,系统仍然稳定运行。

参考文献

[1] 齐旭,曾德文,史大军,等. 特高压直流输电对系统安全稳定影响研究[J]. 电网技术,2006,30(2):1-6.

[2] 廖民传,蔡广林,张勇军. 交直流混合系统受端电网暂态电压稳定分析[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(10):1-4,

[3] 杨雄平,罗向东,李扬絮,等. 南方电网直流闭锁故障时受端系统电压稳定问题分析[J]. 电力系统保护与控制,2008,36(22):40-43.

[4] 董俊,束洪春,司大军,等. 特高压远距离大容量云电送粤中的稳定问题研究[J]. 电网技术,2006,30(24):10-15.

[5] 郑超,汤涌,马世英,等. 网源稳态调压对暂态无功支撑能力的影响研究[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):115-122.

[6] 钟显,樊艳芳,王一波,等. 含高密度风电、交直流送端电网直流闭锁故障稳控方案研究[J]. 电力系统保

护与控制,2015,43(13):130-138.

[7] 李国栋,皮俊波,郑力,等. ± 500 kV 林枫直流双极闭锁故障案例仿真分析[J]. 电网技术,2014,38(4):877-881.

[8] 叶圣永,王云玲,唐权,等. ± 1100 kV“疆电入川”特高压直流输电对四川电网安全稳定影响[J]. 电网技术,2013,37(10):2726-2731.

[9] 卫鹏,汪成根,周前,等. 基于 ADPSS 的锦苏特高压直流对江苏电网运行特性影响研究[J]. 高压电器,2013,49(11):69-75.

[10] 郭小江,马世英,申洪,等. 大规模风电直流外送方案与系统稳定控制策略[J]. 电力系统自动化,2012,36(15):107-115.

[11] 李生福,张爱玲,李少华,等. “风火打捆”交直流外送系统的暂态稳定控制研究[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(1):108-114.

[12] 张爱玲,李少华,张崇见,等. “风火打捆”孤岛特高压直流送端电压和频率控制[J]. 电力系统及其自动化学报,2015,27(3):29-35.

[13] 郑传材,管霖. 云广特高压直流故障特性及其强迫停运对受端系统影响评估[J]. 电网技术,2012,36(1):32-38.

[14] 陈虎,张英敏,贺洋,等. 特高压交流对四川电网多送出直流输电系统影响评估[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(7):136-141.

[15] 陈树勇,逢博,陈得治,等. 新疆电网多送出直流输电系统运行特性分析[J]. 中国电力,2014,47(4):102-107.

[16] 曾宪刚,王志滨,吕伟权. 交直流混合系统中交流故障对直流的影响分析[J]. 高电压技术,2006,32(9):29-32.

[17] Rong Z,Zhanqing Y,Jinliang H,et al. Study on Restraining DC Neutral Current of Transformer During HVDC Monopolar Operation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2011,26(4):2785-2791.

[18] 刘之尧,唐卓尧,张文峰,等. 直流换相失败引起继电保护误动分析[J]. 电力系统自动化,2006,30(19):104-107.

作者简介:

哈丽曼·合孜尔(1989),硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制;

樊艳芳(1971),硕士生导师、副教授,研究方向为电力系统稳定与控制、微电网控制技术研究。

(收稿日期:2016-12-18)

± 800 kV 宾金直流接地极线路电流不平衡异常分析

雷 潇,崔 涛,曾 宏

(国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610072)

摘 要:接地极线路是直流输电系统的重要组成部分,其安全稳定运行对整个系统的可靠性至关重要。然而,近年来国内接地极线路多次发生故障,成为薄弱环节。2016 年 4 月 16 日 ±800 kV 宾金直流输电工程的极Ⅱ线路遭受雷击后绝缘击穿。极Ⅱ线路在直流控保的作用下全压再启动两次成功。在极Ⅱ线路第 2 次再启动过程中,接地极引线不平衡保护动作。通过故障录波分析和登塔检查,发现宜宾换流站接地极线路一侧导线绝缘在极Ⅱ线路接地故障后发生过电压击穿,在重启过程中持续流过直流续流。基于此次故障,详细分析了目前接地极线路多次故障的原因,提出通过改进接地极建立绝缘配合解决此类问题。

关键词:特高压直流输电;接地极线路;招弧角;绝缘配合

Abstract: Safe and stable operation of electrode line is important to the reliability of UHVDC transmission system. However, electrode line fails repeatedly in recent years, which made it a weak part. On April 16, 2016, the pole Ⅱ line of ±800 kV UHVDC Binjin transmission project failed because of lightning stroke. Under the control of protection system, pole Ⅱ restarted successfully in the second time. During the restart procedure, unbalanced protection of electrode line was triggered. Fault records were analyzed and fault tower was checked. It is found that one of the two electrode lines was breakdown under over-voltage. DC on the fault place continued during the whole restart procedure. Based on this fault analysis, the causes of most electrode line faults are analyzed in detail, and solutions based on insulation coordination are presented.

Key words: UHVDC transmission; earthed electrode line; arcing horn; insulation coordination

中图分类号:TM721 文献标志码:B 文章编号:1003-6954(2017)02-0016-03

0 引 言

接地极线路是直流输电系统的重要组成部分,其安全稳定运行对整个系统的可靠性至关重要^[1-4]。然而,近年来接地极线路多次发生故障,引起关注。如国家电网公司 2012 年 7 月 6 日 ±500 kV 呼伦贝尔—辽宁直流输电工程接地极线路绝缘子炸裂、导线脱落^[5],南方电网公司 2012 年 12 月 15 日 ±800 kV 云广直流输电工程接地极线路绝缘闪络引起极Ⅱ强制移相重启^[6]。

特高压直流系统的直流套管与极线发生接地故障后,会在接地极线路引发过电压而击穿绝缘。由于击穿点流过的是直流续流,电弧难以熄灭,绝缘子和金具在持续电弧的烧蚀下损毁,导致掉串和断线等事故。单极大地运行时发生雷击接地极线路也会导致此类事故。接地极线路的典型设计为两根双分裂导线并列,绝缘击穿通常只会发生

在其中一根。根据此特征,国内换流站对接地极线路设置了电流不平衡保护以监测接地故障。该保护出口一般为极平衡控制或闭锁,虽然在一定程度上可减少绝缘损伤的程度,但没有从根本上解决问题。

下面对 2016 年 4 月 16 日 ±800 kV 宾金直流输电工程的一起故障进行详细分析,阐明目前接地极线路多次故障的根本原因,提出通过改进接地极建立绝缘配合解决此类问题。

1 故障与重启过程

2016 年 4 月 16 日 3 时 49 分,±800 kV 宾金直流输电工程宜宾换流站站极Ⅱ电压突变量保护、行波保护动作,极Ⅱ直流线路全压再启动两次成功。在极Ⅱ线路第二次再启动过程中,接地极引线不平衡保护动作。整个过程保护动作时序如表 1 所示。

表 1 保护动作时序

时间	主机	事件
03:49:04:389	极Ⅱ极保护系统 C	行波保护动作
03:49:04:390	极Ⅱ极保护系统 A	行波保护动作
03:49:04:390	极Ⅱ极保护系统 B	行波保护动作
03:49:04:403	极Ⅱ极保护系统 B	电压突变量保护动作
03:49:04:404	极Ⅱ极保护系统 A	电压突变量保护动作
03:49:04:404	极Ⅱ极保护系统 C	电压突变量保护动作
03:49:04:412	极Ⅱ极控系统 A(主)	线路故障再启动动作、极保护启动 线路重启
03:49:04:423	极Ⅱ极控系统 B(从)	线路故障再启动动作、极保护启动 启动线路重启
03:49:04:898	极Ⅰ极极保护 A、B、C	接地极引线不平衡保护平衡双极运行 (双极运行)
03:49:04:898	极Ⅱ极极保护 A、B、C	接地极引线不平衡保护平衡双极运行 (双极运行)
03:49:04:898	极Ⅰ极极保护 A、B、C	极保护启动 双极平衡运行
03:49:04:898	极Ⅱ极极保护 A、B、C	极保护启动 双极平衡运行
03:49:04:930	极Ⅰ极控系统 A(主)	保护降电流限制 直流电流
03:49:04:932	极Ⅰ极控系统 A(主)	保护降电流限制 直流电流

2 接地极线路电流不平衡原因分析

2.1 登塔检查

故障发生后,四川公司对宜宾换流站接地极线路开展巡线,并对近区杆塔作登塔检查。发现 4 号



图 1 4 号塔左侧导线大号侧招弧角的电弧烧蚀痕迹

塔左侧导线大号侧招弧角有电弧烧蚀痕迹,如图 1 所示。招弧角上电极和下电极中部的镀锌层被烧蚀,且烧蚀部分已经起锈。

2.2 故障录波分析

图 2 为极Ⅱ直流线路发生接地故障后故障录波记录的宜宾换流站中性极母线电压波形。电压在起始阶段持续上升,频率约为 75 Hz,峰值 104 kV。达到峰值后,电压衰减振荡,频率约为 530 Hz。由此可判断,接地极线路的绝缘在峰值 104 kV 时刻发生击穿,导致频率突变。

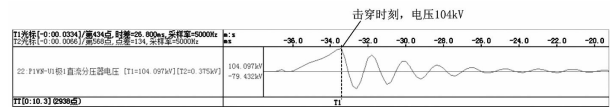


图 2 中性极母线电压波形

极Ⅱ线路接地故障后约 10 ms,极Ⅱ线路执行 3 次再启动逻辑,并在第 2 次重启成功。第 1 次重启等待时间为 150 ms,重启过程 150 ms;第 2 次重启等待时间 200 ms。整个重启过程中,接地极线路左、右导线的电流波形如图 3 所示。

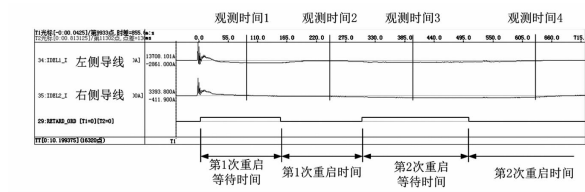


图 3 接地极线路电流波形

接地极线路左右两侧电流波形分为 4 个阶段:

- 1)在第 1 次重启等待时间内,接地极线路左右两导线的电流进入稳态过程后,出现明显不平衡。在观测时刻 1,左侧导线电流 1 910 A,右侧导线电流 7.3 A。
- 2)在第 1 次重启时间内,极Ⅱ直流线路电流开始恢复,接地极线路总电流减小。在观测时刻 2,左侧导线电流 331 A,右侧导线电流 112 A。
- 3)在第 2 次重启等待时间内,极Ⅱ直流线路电流为 0,接地极线路总电流重新增大。在观测时刻 3,左侧导线电流 1 445 A,右侧导线电流 359 A。
- 4)在第 2 次重启时间内,极Ⅱ直流线路电流逐渐恢复,接地极线路左右两导线电流逐渐减小,最终为 0。在观测时刻 4,左侧导线电流 249 A,右侧导线电流 249 A。

根据上述的接地极线路左右导线电流变化情况,可以判断在两次重启过程中,接地极线路击穿点

电弧未熄灭。

接地极线路不平衡保护的逻辑为:不平衡保护动作值 679 A,在双极运行时延时 200 ms 进行极平衡。从进入第 2 次重启等待时间算起,不平衡电流超过 679 A 后 200 ms,不平衡保护动作,进行了极平衡操作。极平衡操作过程发生在第 2 次重启过程中,系统会根据当前电流刷新参考值,使极线电流值存在一定扰动,如图 4 所示。

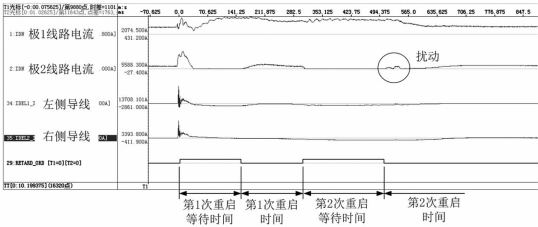


图 4 接地极线路电流扰动波形

3 接地极线路绝缘配合分析

为论证极线故障后产生的接地极线路过电压是否能导致宜宾侧接地极线路杆塔绝缘闪络,对带招弧角的绝缘子串开展了操作冲击和工频耐受试验,如图 5 所示。试品的绝缘结构与宾金直流接地极线路的杆塔一致,招弧角的上电极与下电极之间的空气间隙为 200 mm,绝缘子为 U160BP/170H 型陶瓷绝缘子,结构高度为 170 mm。试验结果表明,工频、操作冲击的击穿电压分别为 109 kV、149.4(+) / 150.0(-) kV,闪络路径为招弧角空气间隙。



图 5 招弧角击穿试验形

故障过电压为 104 kV,主频为 75 Hz 左右,与招弧角工频击穿电压接近,考虑到试验环境和现场环境的差异、招弧角的安装偏差以及高压试验本身的离散性,招弧角在此故障过电压下击穿属于正常现象。

接地极线路绝缘击穿后,因流过的是直流续流,电弧难以熄灭。本次故障中,直流电弧在第 2 次重

启时熄灭,持续时间超过 600 ms,因系统并未满功率运行,最大电流为 2 000 A。若系统满功率运行,电弧更难以熄灭,考虑到电弧对招弧角烧蚀作用,很可能发生招弧角烧断、绝缘子串掉串的严重后果。通过提高接地极线路的绝缘强度以避免在过电压下击穿是目前解决该问题的主要方法。为此,可通过调整招弧角间隙距离以配合过电压。

可建立仿真模型计算直流输电系统的过电压。根据 ±800 kV 宾金直流接地极线避雷器的参数,接地极线路出现的最大过电压为 275 kV,频率约为 75 Hz。图 6 为招弧角间隙距离与工频击穿电压的关系。当间隙距离为 550 mm 时,招弧角在 275 kV 下不会发生击穿。考虑各种因素的影响,在 10% 的误差范围内,招弧角在最大故障过电压 275 kV 不发生击穿的间隙距离至少为 560 mm。

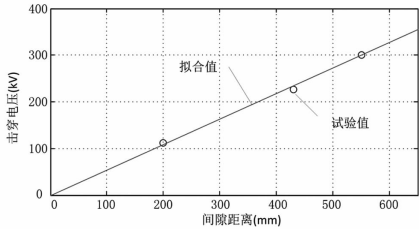


图 6 招弧角的工频击穿电压(峰值)与间隙距离的关系

4 结 论

针对 2016 年 4 月 16 日 ±800 kV 宾金直流发生的接地极线路不平衡保护动作事件,分析了接地极线路绝缘设计问题,得出以下结论和建议:

1)宾金直流接地极线路绝缘强度较低,直线塔的招弧角工频 50% 击穿电压为 109 kV。中性极母线的故障录波显示过电压幅值为 104 kV,主频为 75 Hz。考虑到试验环境和现场环境的差异、招弧角的安装偏差以及高压试验本身的离散性,招弧角在此过电压下击穿属于正常现象。

2)极 II 线路重启成功前,接地极线路的击穿点电弧一直未熄灭,导致左右导线分流不平衡,不平衡电流最大值约 2 000 A。由于线路重启成功,接地极线路电流减小至 0,燃弧时间约 600 ms。因电流小、续流时间短,因此未出现招弧角烧断、绝缘子掉串的严重后果。

3)接地极线路不平衡保护在第 2 次重启中正
(下转第 23 页)

特高压交直流混联条件下四川电网 低频振荡模态分析

张 航,王晓茹

(西南交通大学电气工程学院,四川 成都 610031)

摘 要:以 2017 年“三华”电网模型为基础,研究了含特高压输电线路的四川电网内部的低频振荡模式。对目前已有低频振荡机理进行了总结。通过对不同典型运行方式的分析,指出了含特高压输电线路的四川电网存在的几种振荡模式,并论证了电力系统稳定器(PSS)对抑制该振荡频率的重要性;开展了时域、频域的对比分析及验证,提出时域仿真分析中进行参数辨识的典型经验。最后,对下一步开展低频振荡研究工作的重点和方向进行了展望。

关键词:特高压;低频振荡;强迫振荡;电力系统稳定器

Abstract:Taking the project interconnecting North China Power Grid with Central China Power Grid and East China Grid as the research background, the low – frequency oscillation mode of Sichuan power grid containing UHV transmission lines is studied. With a review and summary of several mechanism of low – frequency oscillation, the main low – frequency oscillation modes in Sichuan power grid with UHV transmission lines are summarized based on the analysis of different typical operation modes, and the importance of power system stabilizer (PSS) to suppress the oscillation frequency is demonstrated. By verifying and analyzing the comparison of both time domain and frequency domain, the typical experiences of parameter identification in the time domain simulation analysis are proposed. Finally, the focus and direction for the future research of low – frequency oscillation are forecasted.

Key words:ultra – high voltage (UHV); low – frequency oscillation; forced oscillation; power system stabilizer

中图分类号:TM712 文献标志码:A 文章编号:1003 – 6954(2017)02 – 0019 – 05

0 引 言

近年来,随着电力系统规模不断扩大,特高压输电线路的增长以及大容量机组、快速励磁装置的投运,互联电网运行愈接近极限临界点,振荡失稳问题日渐严重,最常见的就是低频振荡。低频振荡是电力系统稳定运行中的重要议题,快速并准确地辨识低频振荡模式对电网的低频振荡分析和控制有着极为重要的意义^[1]。中国西部能源基地距离东部重负荷中心较远,外送电力规模很大,发展直流输电技术是大势所趋。在中国已经形成多直流送出和多直流馈入电网,相应的交直流网架系统正逐步建成,其对混联电网的运行和控制也提出了更高的要求。2015 年四川通过特高压输电工程外送清洁水电达到 103 841 GWh,减少火电原煤消耗 4 000 多万吨,减少二氧化碳排放 1.5 亿吨。可以预见,随着经济社会发展以及技术的提升,未来十年随着西南电网

以及西部电网的建设,四川将迎来特高压输电技术大跨越发展时期,而特高压工程使得四川电网和 extern 网之间的电气联系更加紧密。在此背景下,结合四川电网实际工程研究特高压交直流系统下的小扰动稳定性,具有极其重要的工程价值和现实意义。

基于含特高压输电线路的四川电网仿真模型,开展低频振荡专题研究;分析特高压输电工程投产后四川主要存在的低频振荡模式,并对比基于模型和量测数据的辨识结果,结合当前实际工程问题对低频振荡抑制措施提出了建议。

1 低频振荡机理

目前,低频振荡产生机理主要有 3 个方面:负阻尼机理、强迫振荡机理和混沌理论。

负阻尼机理是由 F. P. Demello 于 1969 年提出来的^[2],该理论认为发电机阻尼转矩不足导致了小扰动功角失稳,原因在于高倍率的励磁放大系统导

致系统阻尼下降,系统对某些固有频率的振荡表现出负阻尼特性,抵消了系统固有的正阻尼,使得系统的总阻尼很小或者为负,这样一旦出现扰动,就会引起转子增幅振荡或者振荡不收敛。当远距离输电线路潮流较重时有可能出现阻尼较低甚至为负的低频振荡,若系统中大量使用快速励磁系统,则系统的阻尼问题更为严重。电力系统受到扰动后会出现低频振荡现象,而当系统阻尼较低时低频振荡衰减较慢,振荡持续时间较长,当系统阻尼为负时振荡幅值不断增大,最终引起系统失稳解列。负阻尼机理是目前发展最为完善的低频振荡机理,已成为解析低频振荡现象和设计电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)的主要理论依据。

强迫振荡着重关注于周期性负荷波动或振荡调节的作用。当发电机受到的周期性扰动频率接近系统固有振荡频率时,在该频率下便会引起系统谐振,导致大幅度的功率振荡^[3]。强迫振荡具有当扰动源存在时振荡迅速起振、当扰动源消失时振荡迅速消失和起振后保持等幅同步振荡等特点。文献[4]通过仿真算例分别简要分析了同步力矩系数、阻尼转矩系数、发电机组的惯性时间常数和扰动量幅值对系统共振特性的影响程度,同时归纳出了振荡特性。文献[5]基于能量角度分析了电力系统在发生共振机理低频振荡过程中,内、外能量的变化关系和特征。文献[6]对电力系统中原动机功率和负荷的持续周期性小扰动造成电网强迫功率振荡进行了分析,阐述了这两种扰动源的不同性质。在强迫振荡的研究中,强迫振荡源定位是关键,文献[7-8]分别运用基于能量和波形相似度的方法进行强迫振荡源定位。

混沌理论认为电力系统参数或扰动在一定范围内变化时,由于电力系统非线性影响使得系统参数间相互作用,导致系统稳定结构发生变化,进而产生振荡,如非周期性、似乎无规则的突发性机电振荡。该理论与成熟的线性系统理论相去甚远,受到数学工具的限制,仍停留在理论探索阶段^[9]。

负阻尼机理、混沌机理都与系统本身的固有结构和参数有关,强迫振荡机理与扰动信号有关。除了以上 3 种理论,还有其他原因解释低频振荡现象,例如交直流系统间的相互作用、电网链式分布、区域间功率不平衡^[10]等。值得一提的是,电力系统是一个复杂的动态系统,不同机理的低频振荡可能同时

发生;不同模式的振荡彼此之间有时候会相互作用,这时需考虑系统结构和运行方式对低频振荡模式的影响,准确辨识出低频振荡的主导模式。

2 研究对象及研究方法

采用四川电网 2017 年网架,计算中考虑丰大、枯大这两种典型方式,主要机组的发电机模型多采用考虑阻尼绕组的次暂态模型。当前四川电网接入 500 kV 电网的主力机组主要采用自并励静止励磁系统,励磁系统均配置了电力系统稳定器(PSS)模块,且通过实测建立了励磁系统及 PSS 模型。计算采用的负荷模型为纯静态负荷模型。

当前电网低频振荡分析方法主要可分为频域、时域两大类,依据研究对象和目标的不同以及各种方法的不同特点分别用于不同场合。其中,隐式重启动 Arnorldi 算法属于典型的特征值分析法,在大规模电力系统实际分析中存在一定优势,并已被集成在 PSASP 程序中,下面将采用该方法开展研究。

3 计算结果及分析

3.1 丰大方式下四川电网主要振荡模式

2017 年丰大方式下,采用小扰动稳定分析程序(PSD-SSAP)隐式重启动 Arnorldi 算法得出四川电网内部共 6 个机电振荡模式。其对应的特征值如表 1 所示。

表 1 丰大方式下存在的低频振荡模式信息

模式	频率/Hz	阻尼比	相关比
1	0.757	0.013	8.473
2	0.663	0.023	4.880
3	1.044	0.038	10.326
4	0.987	0.045	9.431
5	0.877	0.047	8.311
6	0.330	0.041	2.828

从表 1 可以看出,模式 2、模式 6 的阻尼比较小,属于弱阻尼模式。下面将分别对这 6 个振荡模式进行详细分析,分析得出每个振荡模式下参与因子较高的机组,并对阻尼比为负或者阻尼比较小的振荡模式通过对相关机组加装 PSS 来提高系统阻尼。

1) 康定和溪洛渡之间的振荡

2017 年丰大方式,存在特征值为 $-0.064 + j4.759$ 、频率为 0.757 Hz、阻尼比为 0.013 的振荡模式,该模式机电回路相关比为 8.473,主要表现为丹巴、康定机组对溪洛渡机组的振荡,机组模态分布图如图 1 所示。

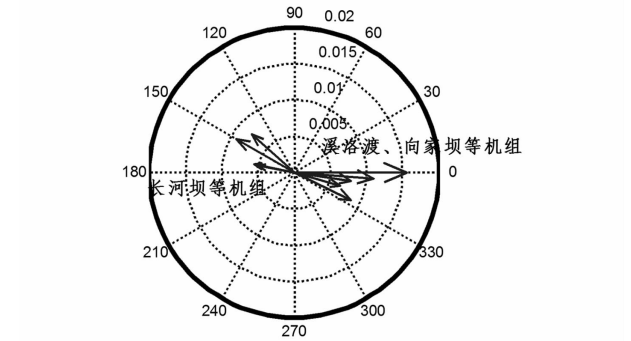


图 1 康定对溪洛渡的振荡模态

通过对溪洛渡左、长河坝机组加装 PSS 后,向家坝左—长河坝间的振荡模式的阻尼比有所增加,振荡频率变为 0.737 7 Hz,阻尼比为 0.070 0,说明溪洛渡机组 PSS 的投入对该振荡模式的抑制效果十分明显。

2) 丹巴对木里模式

该振荡模式频率为 0.663 Hz,阻尼比为 0.023,主要表现为丹巴、康定机组相对乡城、木里机组的振荡,机组模态分布图如图 2 所示。

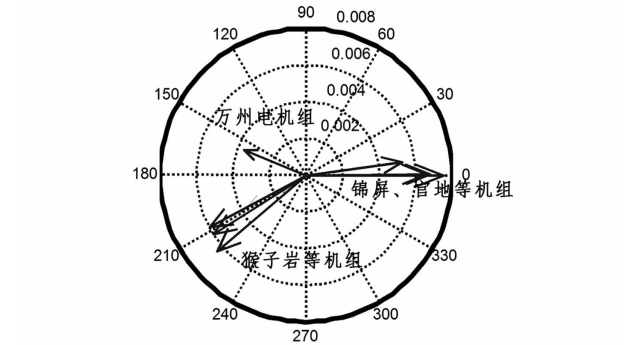


图 2 丹巴对木里的振荡模态

通过对猴子岩、长河坝机组加装 PSS 后,色玉—古瓦间的振荡模式的阻尼比有所增加,振荡频率变为 0.647 1 Hz,阻尼比为 0.038 7。

3) 向家坝机组对乡城机组模式

该振荡模式的频率为 1.044 Hz,阻尼比为 0.038,主要表现为向家坝、新平、方山和乡城地区间的振荡,机组模态分布图如图 3 所示。

4) 锦屏对乡城模式

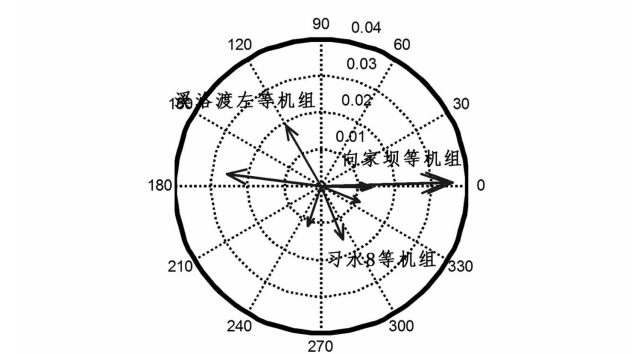


图 3 向家坝对乡城的振荡模态

该振荡模式的频率为 0.987 Hz,阻尼比为 0.045,主要表现为锦屏和乡城、木里间的振荡,机组振荡模态图如图 4 所示。

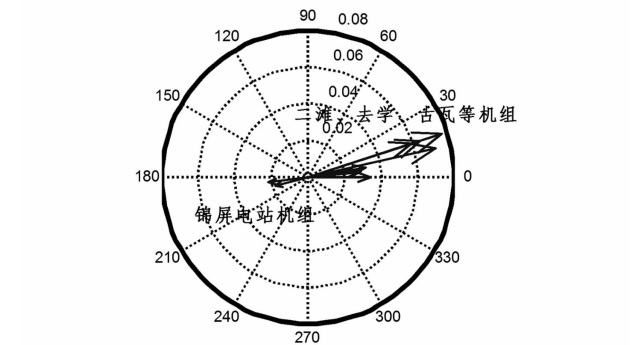


图 4 锦屏对乡城的振荡模态

5) 九石雅机组对康定机组模式

该振荡模式的频率为 0.877 Hz,阻尼比为 0.047,主要表现为九石雅、瀑布沟和丹巴、康定地区间的振荡,机组模态分布图如图 5 所示。

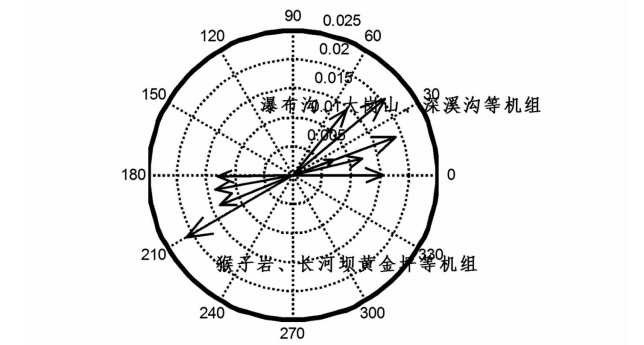


图 5 九石雅对康定的振荡模态

6) 川渝主网对华中、河南模式

该振荡模式的频率为 0.33 Hz,阻尼比为 0.041,主要表现为川渝主网和华中电网间的振荡,机组模态分布图如图 6 所示。

3.2 枯大方式下的振荡模式分析

进一步对四川电网 2017 年枯大方式下的低频振荡特性进行分析,通过 PSASP 软件计算,共得到 3

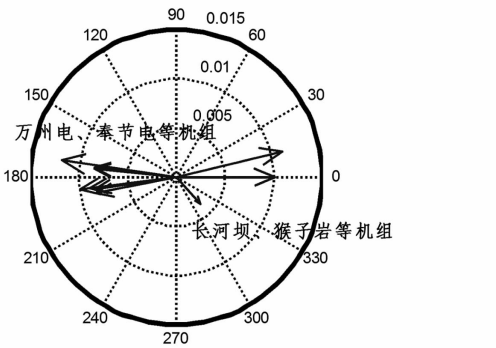


图 6 锦屏对乡城的振荡模式

个机电振荡模式,其对应的特征值如表 2 所示。

表 2 枯大方式下存在的低频振荡模式信息

模式	频率/Hz	阻尼比	相关比
1	0.867	0.028	9.742
2	0.786	0.030	8.125
3	0.320	0.042	6.894

结合表 2 和模态分析结果可知,振荡模式 1 表现为乡城、木里对溪洛渡、向家坝间的振荡,模式 2 表现为丹巴、康定对乡城、二滩间的振荡,模式 3 表现为川渝主网和华中电网之间的振荡。从不同方式下的低频振荡结果可以得出以下结论:两种典型方式下,四川电网主要呈现出乡城、木里对溪洛渡、向家坝,丹巴、康定对乡城、二滩以及川渝主网对华中电网等典型的振荡模式;机组 PSS 投入情况下,上述振荡模式的阻尼比均超过 3%,说明实际运行中机组 PSS 的投入至关重要。

4 大扰动时域仿真及验证

以四川电网对华中电网的振荡模式为例进行时域仿真验证。经分析,尖山桃乡尖侧故障易引起特高压解列,四川、湖北间可能出现动态失稳现象。图 7 所示为尖山桃乡桃侧 N-1 故障后二滩机组和三峡机组间的功角差曲线。

采用滑动窗法^[11]对该功角差曲线进行 Prony 分析。设单个数据窗时长为 5 s,相邻数据窗时间间隔为 2 s,滑动窗区间为 5~25 s,每个滑动窗内数据均采用两种方法分别辨识振荡模式的频率和阻尼比,可得到 9 组辨识结果,其统计值如表 3 所示。

对比时域仿真分析和基于模型的分析结果(表 2 模式 3)可知,两种方法分析结果基本一致。对其

他振荡模式进行对比分析,可得到类似结论,因篇幅所限不再赘述。

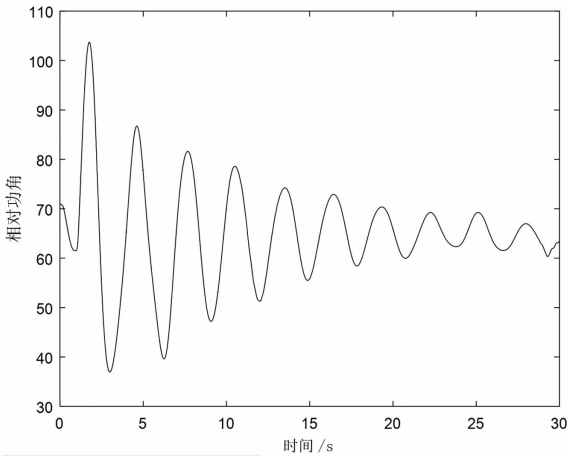


图 7 二滩机组和三峡机组间的功角差曲线

表 3 基于仿真数据的辨识结果

算法	频率		阻尼比	
	均值/Hz	标准差/Hz	均值/%	标准差/%
Prony	0.350 6	0.007 6	6.98	2.07

5 结 论

1) PSS 的投入对抑制低频振荡至关重要,若相关机组 PSS 退出,各模式阻尼比均大幅下降,甚至出现负阻尼模式,说明实际运行中机组 PSS 的投入至关重要。

2) 进行了大扰动时域仿真,并与频域分析进行了对比。结合实际工程经验,应用传统分析方法进行了参数的辨识。

3) 因篇幅所限,未对低频振荡的抑制措施展开深入讨论;考虑措施主要以投入 PSS 为主,但实际上,PSS 只是改善了弱阻尼模式所对应的特征值,其对系统机电振荡阻尼特性的改善主要体现在阻尼优化调节上,即优化了原系统的极点配置,并没有增加系统的总阻尼,某些情况下,还是可能会出现低频振荡现象。对低频振荡的抑制,应从一次、二次系统统筹考虑,并充分运用现有新技术,研究有效的在线预警和控制方法^[12]。

参考文献

[1] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统理论和分析 [M]. 北京:清华大学出版社,2002.
[2] F. P. Demello. Concepts of Synchronous Machine Stability

as Affected by Excitation Control[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System,1969,88(4):316-329.

[3] 汤涌. 电力系统强迫功率振荡的基础理论[J]. 电网技术,2006,30(10):29-33.

[4] 韩志勇. 电力系统低频振荡的分析和控制[D]. 北京:华北电力大学,2005.

[5] 韩志勇,贺仁睦,徐衍会,等. 基于能量角度的共振机理电力系统低频振荡分析[J]. 电网技术,2007,31(8):13-16.

[6] 韩志勇,贺仁睦,马进,等. 电力系统强迫功率振荡扰动源的对比分析[J]. 电力系统自动化,2009,33(3):16-19.

[7] Lei Chen, Yong Min, and Wei Hu. An Energy-based Method for Location of Power System Oscillation Source[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3):828-836.

[8] 董清,梁晶,颜湘武,等. 大规模电网中低频振荡扰动源的定位方法[J]. 中国电机工程学报,2012,32(1):

78-83.

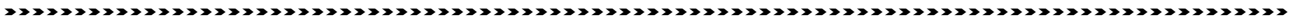
[9] 檀斌,薛葛胜. 多机系统混浊现象的研究[J]. 电力系统自动化,2001,25(2):3-8.

[10] Wen-Shou Kao, KAO The Effect of the Low-frequency Oscillations Damping in Taipower System Experience w/wo Power System Stabilizer[C]. Power Engineering Society Summer Meeting,2001.

[11] 丁蓝,薛安成,李津,等. 基于窗口滑动改进 Prony 算法的电力系统低频振荡识别[J]. 电力系统自动化,2010,34(22):24-28.

[12] 王超,李继红,李颖毅,等. 淮沪特高压投产后的华东电网低频振荡特征分析[J]. 电力系统自动化,2013,37(18):120-125.

作者简介:
张 航(1994),硕士研究生,研究方向为交直流电网稳定性分析与控制。
(收稿日期:2016-11-29)



(上接第 10 页)

[3] 何健,陈光. 新型铝合金芯铝绞线在输电线路中的应用[J]. 吉林电力,2011,15(2):45-49.

[4] 叶鸿声. 中强度全铝合金导线在输电线路中的应用[J]. 电力建设,2010,31(12):10-20.

[5] 万建成,李健,陈媛,等. 铝合金芯铝型绞线在大容量直流线路中的应用[J]. 电力建设,2013,34(8):105-106.

[6] 布春磊,周海鹰,江明. 特高压直流输电线路大截面钢芯铝绞线选型研究[J]. 电力建设,2013,34(9):102-104.

作者简介:
周 唯(1982),硕士、高级工程师,从事输电线路技术设计工作;
刘翰柱(1978),学士、高级工程师,从事输电线路技术设计工作;
谢 静(1981),硕士、高级工程师,从事输电线路技术设计工作;
梁 明(1973),学士、教授级高级工程师,从事输电线路技术研究及设计工作。
(收稿日期:2016-12-10)



(上接第 18 页)

确动作。系统会根据当前电流刷新参考值,使极线电流在重启过程中存在一定扰动。

4)为保证接地极线路在故障过电压下不发生闪络,建议招弧角间隙距离应至少增大到 560 mm。

参考文献

[1] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2004.

[2] 王彪,王渝红,丁理杰. 高压直流输电接地电极及相关问题综述[J]. 电力系统及其自动化学报,2012,24(1):66-72.

[3] 赵杰,何金良. 特高压和高压直流输电系统共用接地

极模式分析[J]. 中国电力,2007,40(10):45-47.

[4] 张劲松. 高压直流输电共用接地极主要设计原则[J]. 中国电力,2007,40(6):48-50.

[5] 张冯硕,吴高波,李健,等. 特高压直流接地极线路绝缘配合研究[J]. 电力建设,2015,36(2):86-90.

[6] 陈灿旭,刘茂涛,宋述波. ±800 kV 云广直流“12.15”事故原因分析及防范措施[J]. 电力系统自动化,2013,37(23):125-129.

作者简介:
雷 潇(1988),博士、工程师,主要从事电力系统过电压与接地技术研究工作。
(收稿日期:2016-12-03)

宜宾换流站阀水冷系统应对 交流电网扰动改进措施分析

宋稚霖¹, 张华杰²

- (1. 国家电网公司运行分公司宜宾管理处, 四川 宜宾 644000;
- 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

摘要:换流阀水冷系统是特高压直流输电系统的重要组成部分,当特高压直流系统两端的500 kV交流电网突发扰动时,会导致阀水冷系统保护动作,造成负荷丢失。简述复龙、中州换流站阀水冷系统造成的事故;并对复龙、中州换流站事故原因进行简单分析。在此基础上分别对宜宾换流站的水冷系统在主循环泵启动方式、站用电设备自投与主循环泵切换时间、主循环泵电源开关选型等方面作出了改进措施,有效增强了阀水冷流量保护抵抗交流电网扰动的能力,明显提高了宾金直流输电系统运行的可靠性。

关键词:特高压直流;阀水冷系统;交流电网突发扰动

Abstract:The converter valve cooling system is an important part of ultra – high voltage direct current(UHVDC)transmission system. When 500 kV AC power grid at both ends of UHVDC system has disturbances, the protection of valve cooling system will act which makes load losing. The accidents of Fulong and Zhongzhou converter stations are introduced briefly, and the reasons of their valve cooling system problems are analyzed. Then the valve cooling system of YiBin converter station is improved on the way by modifying the start – up mode of main circulation pump, reducing the time of closing the spare power automatic switch and the spare circulation pump switch and changing the switch of main circulation pump power. Those measures effectively enhance the ability of valve water flow against the disturbances of AC power grid, which significantly improves the operation reliability of Bin – Jin DC transmission system.

Key words:UHVDC; valve cooling system; sudden disturbance of AC power grid

中图分类号:TM772 文献标志码:B 文章编号:1003 – 6954(2017)02 – 0024 – 04

0 引言

相比于交流输电线路,直流输电系统在长距离大容量输电方式上存在着明显的优势^[1]。中国幅员辽阔,电源和负荷逆向式分布,随着国内直流输电技术飞速发展,超高压、特高压直流输电工程在中国输电网架中得到了广泛应用^[2]。如何保障直流输电线路的可靠性已经成为研究直流输电的热点问题^[3]。换流站的阀水冷系统是确保换流阀连续正常工作的重要组成部分^[4],在发生交流侧电网的突发故障时,可能会造成阀水冷保护的误动作^[5],导致直流输电线路负荷丢失。保障阀水冷系统的安全、稳定运行,增强其交流侧突发振荡的抗干扰能力,对直流输电系统的安全稳定运行具有重要意义^[6]。

结合复龙、中州换流站因500 kV交流侧电网突发扰动导致阀水冷系统保护跳闸的事件,分别对宜宾换流站的阀水冷主循环泵启动方式、站用电设备自投与主循环泵切换时间、主循环泵电源开关选型等3个方面在复龙、中州换流站的基础上作出了改进措施,并分析相应的改进效果,增强了宜宾换流站的阀水冷系统的可靠性。

1 换流阀水冷系统保护误动事件及试验简述

1.1 复龙换流站阀水冷流量保护动作事件

2013年7月5日13时50分,复奉直流逆变侧(奉贤站)交流系统故障引起双极四阀组换相失败。换相失败导致整流侧(复龙站)500 kV交流侧电网突发扰动,造成复龙站站用电系统异常振荡,此次事

件导致复龙换流站阀水冷系统8台主循环泵中的6台流量低保护动作,造成4台双极端阀水冷主循环泵全部停运,损失负荷达到3 200 MW。其中换相失败时,复龙站交流侧的录波器波形如图1所示。

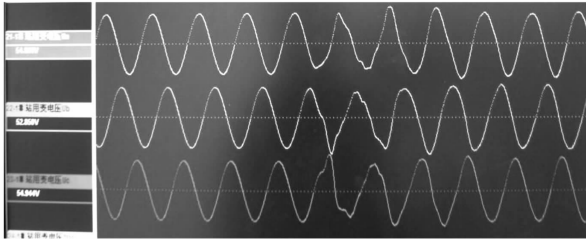


图1 复龙站500 kV交流侧电压波形

1.2 复龙换流站备自投功能配合试验

当500 kV交流侧电网突发振荡时,有可能会导 致换流站内站用电系统的备自投功能动作。复龙站主循环泵站用电配置结构如图2所示,由两段10 kV母线及两段400 V母线组成,主循环泵的交流电源分别取自不同400 V母线段,两段10 kV母线是为400 V母线供电。其备自投配合逻辑为:当10 kV进线电压低于额定电压的70%时,延时1.02 s后10 kV进线开关自动断开,再延时0.58 s后10 kV联络开关自动合上继续为负荷供电。当400 V进线电压低于额定电压的70%时,延时4 s后400 V进线开关自动断开,再延时1 s后400 V联络开关自动合上继续为负荷供电。

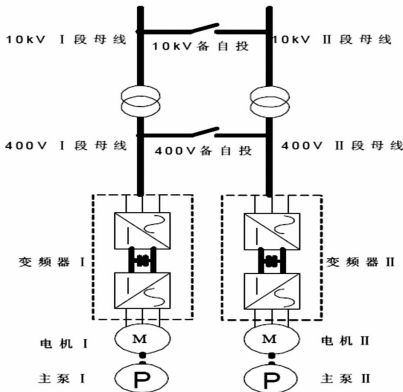


图2 复龙换流站主循环泵启动回路配置

复龙站在建站验收期间进行了2次站用电备自投与主循环泵切换时间配合功能试验。在对10 kV和400 V备自投试验时,发生在主循环泵启动过程中由于阀内水冷流量低导致流量保护动作跳闸^[8]。

1.3 中州换流站主循环泵启动回路电源开关脱扣事件

2014年1月15日,中州换流站在进行500 kV

线路单相短路接地故障试验时,站用电400 V交流母线电压受到扰动,三相电压波形产生畸变,持续时间约为52 ms,波动期间电压均出现不同程度下降,其中B相电压下降最大,峰值电压约为正常值的30%,持续时间约为40 ms。试验造成4台运行主循环泵启动回路电源开关全部过流跳闸,并切换至备用主循环泵运行。扰动时的400 V站用电母线电压波形如图3所示。

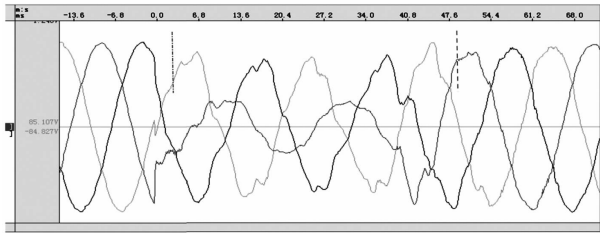


图3 故障时400V站用电母线电压波形

2 交流侧电压扰动造成阀水冷系统故障的原因分析

通过复龙、中州换流站发生的事故以及相关的试验可以看出,阀水冷系统的误动作是由交流侧出现电压扰动而引起的。现对上述事件和试验所造成的阀水冷系统保护误动作的原因进行分析。

2.1 复龙换流站阀水冷流量保护动作原因分析

复龙换流站阀水冷主循环泵启动方式为变频器控制,其具体配置如图2所示。500 kV交流侧电压出现扰动时,会出现瞬时过电压,导致变频器中间直流电压上升,造成变频器直流过压保护动作。通过对复龙换流站软件仿真可知,当复龙站500 kV交流系统侧电压出现扰动时,扰动波形如图4所示,变频器会出现过电压,变频交流器中间直流电压如图5所示。当复龙换流站阀水冷主循环泵启动回路中的变频器发生故障时,只能切换至备用变频器启动回路,若备用回路中的变频器也同时故障,将导致两台

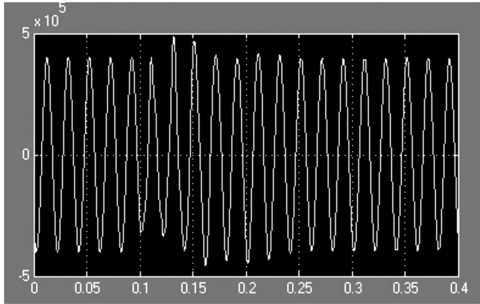


图4 500 kV交流系统电压波形

主循环泵停运, 阀水冷流量低保护动作出口。

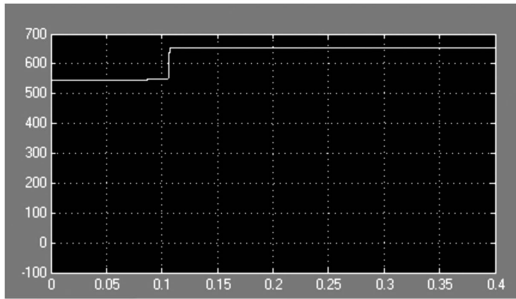


图 5 变频器中间直流电压波形

2.2 复龙换流站备自投功能配合试验造成保护动作原因分析

当 500 kV 交流侧电网突发振荡时, 有可能会导 致换流站内站用电系统的备自投功能动作, 此时若 站用电备自投与主循环泵切换时间配合不到位, 将 严重影响阀水冷的主水流量, 导致流量保护动作。 在对复龙主循环泵站备自投试验中, 10 kV 和 400 V 备自投的切换, 均导致主循环泵启动过程中由于 阀内水冷流量低导致流量保护动作跳闸^[8]。

2.3 中州换流站主循环泵启动回路电源开关脱扣 原因分析

当交流侧电压出现扰动时, 会造成站用交流电 压下降。中州换流站的 400 V 交流母线三相电压均 在交流侧故障时出现不同程度下降, 短时间内运行 的电动机处于半失电状态, 但电动机在机械惯性的 作用下仍在转动, 在其转动尚未停止前, 400 V 交 流母线电压迅速恢复又令其再次启动。因为残留剩 磁的存在, 此时外施偏磁叠加残留剩磁的作用会使其 内部电气特性产生畸变, 进而产生冲击电流, 最高可 达到 17 倍的额定电流值(I_n); 中州换流站主循环泵 启动回路电源开关最初选型时的短路动作电流值 (脱扣电流值) 远小于故障时产生的冲击电流值, 所 以主循环泵电源开关过流保护动作。

3 宜宾换流站阀水冷系统的改进措施

3.1 阀水冷主循环泵启动方式改进措施

宜宾换流站阀水冷系统在复龙站的基础上对主 循环泵启动方式做出改进措施。其主循环启动由软 启动器控制, 并在软启动回路之外又增加了工频回 路。具体配置如图 6 所示, 主循环泵正常启动时通

过软启动器控制, 当主循环泵在软启动器回路运行 稳定后, 自动切换至工频回路保持长期运行。

软启动器和变频器的区别在于^[7]: 软启动器是 个调压器, 用于电机启动, 输出时改变电压不改变频 率; 而变频器是用于需要调速的地方, 其输出时不但 改变电压也同时改变频率。变频器启动方式易受外 部电压影响, 对于恒定频率和负荷的设备较为不适 合。软启动器启动方式受外界电压变化扰动影响较 小, 具有较好的启动特性, 且启动参数可调。

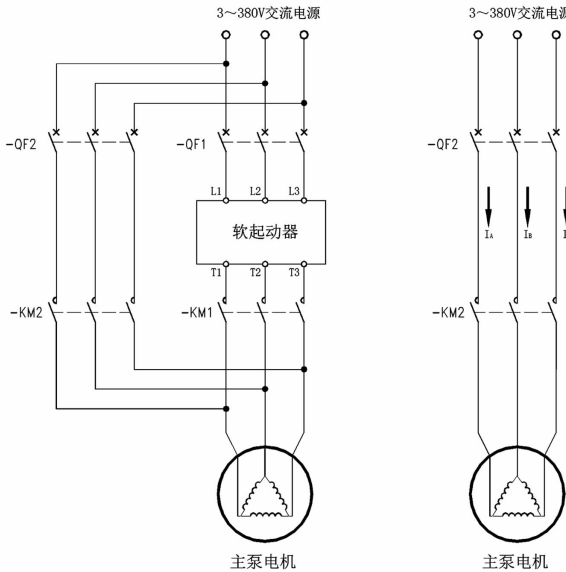


图 6 宜宾换流站主循环泵启动回路配置

当复龙换流站阀水冷主循环泵启动回路中的变 频器发生故障时, 只能切换至备用变频器启动回路; 若备用回路中的变频器也同时故障, 将导致两台主 循环泵停运, 阀水冷流量低保护动作出口。而宜宾 换流站启动回路中的变频器发生故障时, 若备用泵 软启回路和工频回路均正常时, 则切换至备用泵软 启回路启动。当软启回路稳定运行后, 切换至备用 工频回路长期稳定运行; 若备用泵软启回路故障且 工频回路正常时, 切换至备用泵工频回路启动并稳 定运行; 若备用泵软启回路正常且工频回路故障时, 切换至备用泵软启回路启动并稳定运行。若备用泵 软启回路和工频回路均故障, 运行泵软启回路正常 时, 则延时 3 s 后切换至运行泵软启回路启动并保 持长期稳定运行。

由此可知, 当换流站 500 kV 交流侧电网突发扰 动时, 软启动器回路加工频回路的主循环泵启动方 式具有更强的抗干扰能力, 保证了阀水冷主循环泵

的可靠运行,增强了阀水冷系统的运行稳定性。

3.2 站用电备自投与主循环泵切换时间改进措施

根据复龙站站用电备自投功能的参数设置及阀水冷流量保护动作的原因分析,宜宾站对阀水冷系统及站用电系统进行了如下改进:

1)在备自投切换时间上做出改进,尽量减小 400 V 备自投时间定值以缩短主泵电机丢失电源时间。优化后的 400V 备自投时间定值为延时 3.8 s 后 400 V 进线开关自动断开,再延时 0.9 s 后 400 V 联络开关自动合上继续为主循环泵供电。优化备自投时间定值后,保证低流量保护不会跳闸。

2)在备用主循环泵启动延时上做出改进。若发生交流系统扰动或工频回路故障,将直接切换至备用泵的软启回路启动,阀水冷控制系统内无延时设置,可以使备用泵快速启动,及时建立主水流量。

3.3 阀水冷主循环泵启动回路电源开关选型的改进措施

为防止主循环泵启动回路电源开关的短路动作电流值(脱扣电流值)过小而导致开关本体过流保护动作,宜宾站阀水冷主循环泵电机所配置的启动回路电源开关脱扣电流定值均大于 17 倍的电机额定运行电流值,其所采用的电源开关参数如表 1 所示。避免了因 400 V 交流母线电压扰动导致主循环泵启动回路电源开关脱扣的设备隐患,从而保证了阀水冷系统的稳定性。

表 1 启动回路电源开关参数

型号	额定电流 /A	保护方式	热保护范围/A	短路保护范围/A
S5N400 320 PR211	220	过载和短路	160 ~ 220	480 ~ 3 840

4 结 论

阀水冷系统安全稳定运行对于保证特高压直流输电系统的可靠运行具有重大意义。为保障阀水冷系统可靠运行,避免发生 500 kV 交流侧电网突发扰动而造成阀水冷系统误动作的情况,宜宾换流站做出了如下的改进措施,并取得了良好的效果:

1)在阀水冷主循环泵启动方式上,宜宾换流站采用了软启动器启动后自动切换至工频回路保持长

期运行的改进措施,即使软启动器故障,主循环泵仍可通过工频回路继续运行。与复龙换流站的变频器回路控制启动方式相比,具备了更高的稳定性,电源回路也增加了更多的选择,避免了因主循环泵启动元件故障导致主循环泵停运的隐患,增强了阀水冷系统抵御交流电网振荡的能力。

2)在站用电备自投与主循环泵切换时间上做出改进。更改站用电 400 V 备自投功能的时间定值后,最大限度地保证了阀水冷主循环泵的电力供应。取消水冷控制系统内两台主循环泵之间切换的延时设置,给主水回路流量提供了持续的动力,确保阀水冷流量保护不会因站用电系统扰动切换而导致跳闸。

3)在主循环泵启动回路电源开关选型的问题上,宜宾站充分汲取中州换流站的调试经验,后期更换了全部阀水冷主循环泵电源开关,开关本体的过流保护定值均大于电机额定运行电流值的 17 倍,避免了因站用电交流系统短时扰动导致阀水冷主循环泵启动回路电源开关脱扣的隐患。

参考文献

[1] 舒印彪. 中国直流输电的现状 & 展望[J]. 高电压技术, 2004, 30(11):1-2.

[2] 吕蓓蕾, 李倩, 周国战. 探析电力工程技术在智能电网建设中的应用[J]. 山东工业技术, 2016(13):171.

[3] 姚良忠, 吴婧, 王志冰, 等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报, 2014(34):6007-6020.

[4] 毛志平, 武剑利, 孙鹏. 基于 ABB 阀冷技术冷却塔检修状态的分析和优化[J]. 湖南电力, 2013, 33(5):52-54.

[5] 杨光亮, 郇能灵, 郑晓冬. 换流站阀水冷系统导致直流停运隐患分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18):199-203.

[6] 黄晨. 换流站阀水冷系统保护分析及优化[D]. 广州:华南理工大学, 2015.

[7] 李龙蛟. 复龙站阀水冷流量保护跳闸隐患分析及处理[J]. 广州:华中电力, 2012, 25(3):15-17.

[8] 李萍. 变频器和软启动器的区别及优劣比较[J]. 科技与企业, 2015(5):227.

(收稿日期:2016-11-18)

四川电网扰动对川渝断面及特高压 联络线功率波动影响仿真研究

张 鹏, 孙永超

(国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

摘 要:大规模交流同步电网中,某个区域发生的扰动不仅会影响到本区域,而且会通过区域间交流联络线对与之互
联的其他区域电网产生影响。基于四川电网及华北、华中电网 PSASP 仿真模型,研究了四川电网不同地点切机及三
相接地短路两种扰动类型对川渝断面及华北、华中电网特高压联络线有功功率波动的影响。

关键词:功率波动;交流联络线;特高压;扰动

Abstract:For a large synchronized interacted power grid, the disturbances inside one area may affect not only the area itself,
but also other areas connected to this area through tie lines. Based on PSASP simulation models, the effect of two kinds of dis-
turbances inside Sichuan power grid, that is, loss of generation and three phase to ground fault, on power oscillation of Chuan
- Yu section and that of UHV tie lines connecting Huabei power grid and Huazhong power grid is studied.

Key words:power oscillation; AC tie lines; ultra - high voltage; disturbance

中图分类号:TM711 文献标志码:A 文章编号:1003 - 6954(2017)02 - 0028 - 03

0 引 言

电网互联是现代电网发展的一大趋势。大规模
互联电网在实现资源优化配置,增强供电可靠性的
同时,也给电网运行带来了一些问题。比如,对于多
个区域电网互联形成的大规模同步电网,某个区域
产生的扰动会导致联络线功率波动,从而对与之互
联的其他区域产生影响。联络线功率波动严重制约
其输送能力,而一旦产生负阻尼振荡,有可能导致系
统失稳解列。多篇文献从不同角度针对联络线功率
波动问题开展研究,文献[1 - 2]分别基于两机模型
对联络线功率波动峰值计算方法进行了研究;文献
[3]基于概率统计理论研究了随机扰动下联络线功
率波动幅值与阻尼比的关系;文献[4]对华中 - 华
北交流同步电网进行简化等值建模,并基于简化模
型研究扰动的传播特性;文献[5 - 6]均从能量计算
的角度对故障后系统中暂态能量的产生和流动过程
以及特高压电网扰动冲击传播机理进行阐述;文献
[7]基于电网支路功率分布特性法分析发电机状态
量对联络线功率振荡的影响,并制定相应的控制措
施;文献[8 - 9]对特高压直流系统故障引起的交流
联络线功率波动进行研究;文献[10 - 11]基于储能

装置提出联络线功率振荡抑制策略。

四川电网通过川渝联络线连接重庆电网并进而
与华中电网相连,华中电网则通过晋长治—南阳—
荆门特高压联络线与华北电网互联。作为全国最大
的水电外送基地,四川电网有着举足轻重的地位,有
必要研究其网内功率扰动对相关交流联络线功率波
动的影响。基于四川电网及华北、华中电网详细的
PSASP 仿真模型,研究了四川电网不同地点切机及
三相接地短路两种扰动类型对川渝断面及华北、华
中电网特高压联络线有功功率波动的影响。

1 网架结构简介

图1所示为四川电网与周边电网连接情况。四
川电网通过三大特高压直流输电线路(复奉、宾金、
锦苏)与华东电网相连,通过德宝直流连接西北电
网;通过川渝联络线连接重庆电网并进而与华中电
网相连;2014年川藏联网工程之后,四川电网与西
藏电网通过川藏交流联络线相连。华中电网则通过
晋长治—南阳—荆门特高压联络线(以下简称特高
压联络线)与华北电网互联。下面主要研究交流联
络线功率波动情况,所用模型为川藏联网之前的模
型,因此,主要研究四川电网扰动对川渝断面(即洪

板线和黄万线两条交流联络线)以及特高压联络线功率波动影响。

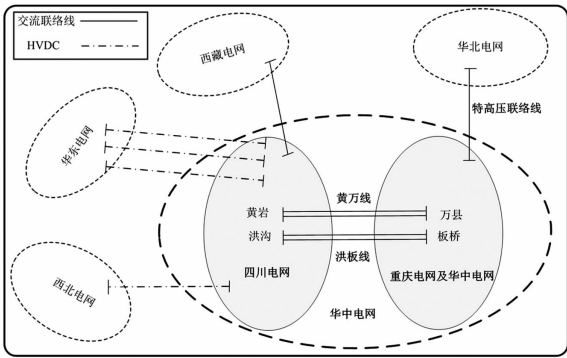


图1 四川电网与周边电网联系图

2 四川电网切机扰动对联络线功率波动影响

在特高压功率北送情形下研究四川电网切机扰动对联络线功率波动影响。之所以选择切机扰动,是因为切机可以精确获知扰动功率大小,从而能够进行定量计算。切机地点选择在四川3个大型水电基地:二滩、向家坝和溪洛渡。

分别在二滩、向家坝和溪洛渡进行切机实验,切机量从100 MW到1 500 MW,以每100 MW为一个阶梯进行递增。图2~图4分别为三大水电基地切机后川渝断面以及特高压联络线上功率波动情况。计算川渝断面输送功率时,采用将洪板线双回线和黄万线双回线功率相加的方式。川渝断面功率流向从四川到重庆,特高压联络线功率选取山西长治到河南南阳段线路功率,从南阳流向长治。

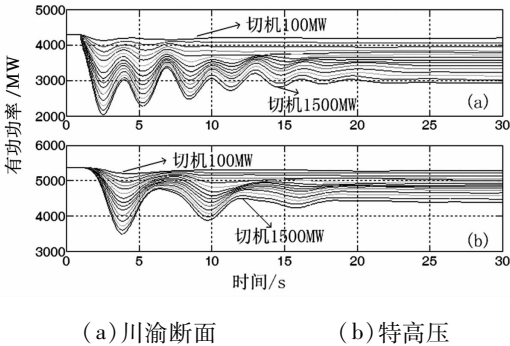


图2 二滩切机后联络线功率波动情况

由图2~图4可知,3处切机扰动均会导致联络线功率跌落,其中:在川渝联络线上功率振荡频率约为0.35 Hz;在特高压联络线上功率振荡频率约为0.17 Hz;振荡均为正阻尼振荡,约20 s后在系统阻

尼作用下振荡消失,系统进入新的稳态;功率跌落幅值均在第1个峰值达到最大值。

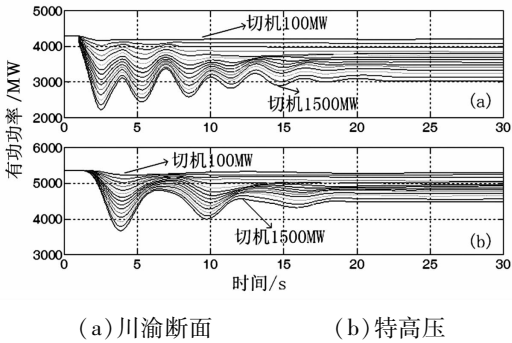


图3 向家坝切机后联络线功率波动情况

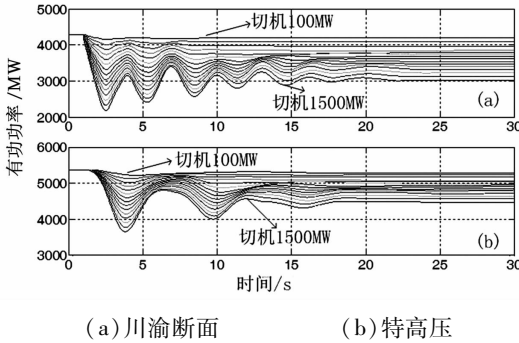


图4 溪洛渡切机后联络线功率波动情况

由于功率跌落的最大幅值最能反映四川电网内切机后对联络线功率的影响,因此,此处对3处切机扰动导致的联络线功率跌落峰值做进一步分析。

图5~图7分别为三大水电基地切机后川渝断面以及特高压联络线上功率波动最大值与切机量关系图。可以看出,无论对于川渝联络线,还是特高压联络线,切机所导致的联络线功率波动幅值与切机量基本满足线性关系。

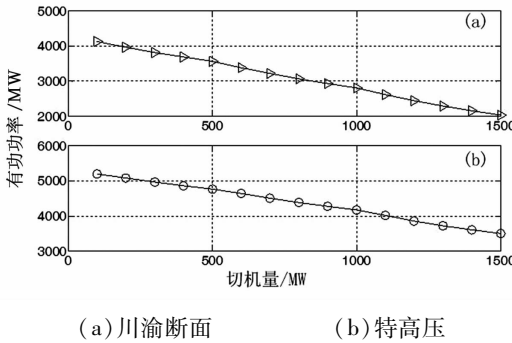


图5 二滩切机后联络线功率波动最大值

表1为三大水电基地切机后川渝断面以及特高压联络线上功率波动最大值与切机量线性关系的斜率近似值。由表1可以看出,3处切机点切机扰动发生后,川渝断面及特高压联络线上功率波动最大值都大于扰动功率值,川渝断面所受影响大于特高

压联络线所受影响;同时也可以看出,二滩切机后对联络线功率波动影响要略大于其他两处切机点,但总体来看不同地点的切机扰动对联络线功率波动影响差别不是特别大。基于该斜率,可近似估算某切机量下联络线功率最大变化量。比如,二滩切机 2 000 MW 时可以估算得到川渝断面最大功率跌落值为 3 046 MW,而特高压联络线最大功率跌落值为 2 524 MW。

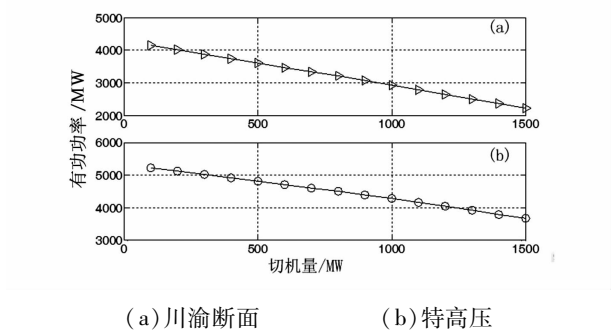


图6 向家坝切机后联络线功率波动最大值

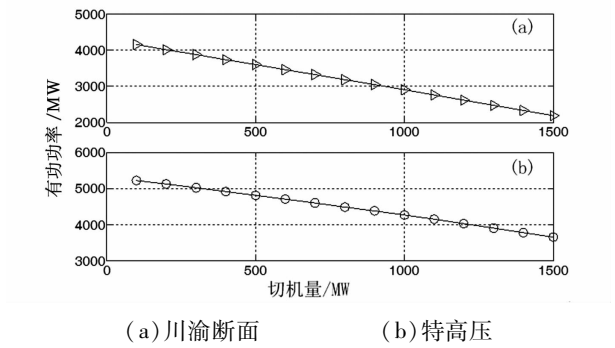


图7 溪洛渡切机后联络线功率波动最大值

切机地点	斜率	
	川渝断面	特高压联络线
二滩	1.523	1.262
向家坝	1.378	1.134
溪洛渡	1.415	1.151

3 四川电网三相接地短路对联络线功率波动影响

基于四川电网内 8 处 500 kV 母线三相短路故障,研究该类型故障对川渝断面及特高压联络线功率波动影响。8 处母线分别选在尖山、东坡、月城、谭家湾、桃乡、资阳、蜀州以及雅安变电站。

图 8、图 9 分别为以上不同地点 500 kV 母线三相接地短路后川渝断面和特高压联络线有功功率波

动情况。

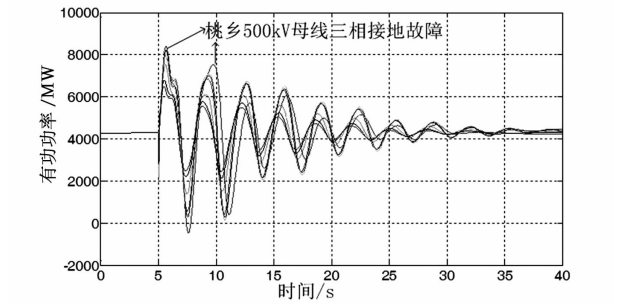


图8 不同地点三相接地短路川渝断面功率波动情况

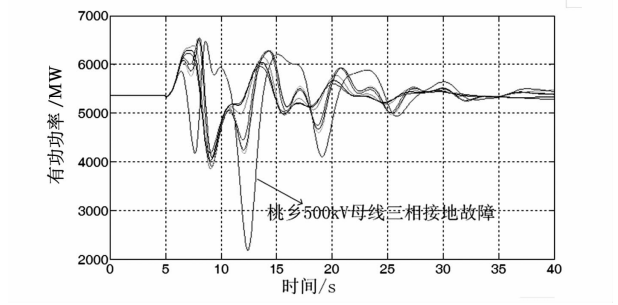


图9 不同地点三相接地短路特高压
联络线功率波动情况

从图 8 和图 9 可以看出,不同地点 500 kV 母线三相接地短路对所引起的川渝断面和特高压联络线功率主导振荡频率与切机扰动类似,对于川渝断面仍约为 0.35 Hz,对于特高压联络线仍约为 0.16 ~ 0.17 Hz。但三相接地短路故障同时激发出其他频率振荡模式,这一点对于特高压联络线功率波动尤其明显,表现为振荡并非是衰减的正弦波,而是某一衰减的畸变波形。而不同地点 500 kV 母线三相接地短路对所引起的川渝断面和特高压联络线功率振荡幅值差别较大,比如,对于川渝断面,正常运行时功率为 4 300 MW,当短路地点位于桃乡时,功率最大上升至 8 400 MW,功率最大涨幅为 4 100 MW;最小跌落至小于 0,即出现功率反送情形,功率最大跌幅约 4 500 MW。对于特高压联络线,正常运行时功率为 5 365 MW,当短路地点位于桃乡时,功率最大上升至 6 471 MW,功率最大涨幅约 900 MW;最小跌落至小于 2 209 MW,功率最大跌幅约 3 100 MW。而在月城发生三相接地短路时,在川渝联络线上产生的功率最大涨幅和跌幅分别为 2 200 MW 和 1 800 MW;在特高压联络线上产生的功率最大涨幅和跌幅分别为 800 MW 和 1 000 MW。在这 8 处地点短路实验中,川渝断面受到的影响都明显大于特高压联络线受到的影响。

(下转第 50 页)

基于 Cadna/A 软件的特高压变电站噪声影响研究

陈晓琳

(四川电力设计咨询有限责任公司,四川 成都 610041)

摘要:特高压变电站噪声对周围环境的影响愈发明显,已成为亟待解决的环境问题。这就必然需要提高变电站噪声控制标准,优化变电站噪声控制设计。基于 Cadna/A 噪声预测软件对某规划的 1 000 kV 特高压变电站本期及远期站界噪声进行预测分析,并提出合理的噪声治理措施,为建设项目的可行性提供依据和环境影响评价提供技术支持。

关键词:特高压变电站;噪声预测;降噪措施;Cadna/A

Abstract:The impacts of ultra – high voltage (UHV) substation on the surrounding environment are becoming increasingly apparent. It also has become an environmental problem to be solved urgently. Therefore, it is necessary to take measures to reduce noise impact on the outside acoustic environment in the phase of project design. The current and future boundary noise of a planned 1 000 kV UHV substation are predicted and analyzed with Cadna/A. Reasonable measures for noise control are also provided. It could provide evidence for the feasibility of construction projects and technical support for environmental impact assessment.

Key words:ultra – high voltage (UHV) substation; noise prediction; noise control measures; Cadna/A

中图分类号:X593 文献标志码:A 文章编号:1003 – 6954(2017)02 – 0031 – 03

0 引 言

近年来,随着经济的高速发展、城市化进程的不断加快,用电负荷快速增长,中国电网必须建设长距离、大容量的特高压交直流电网^[1-4],形成全国统一的联网工程,从而实现在全国范围内的资源优化配置。特高压变电站的建设成为必然,但其电气设备产生的噪声也明显增大,对周围环境的影响愈发明显,其噪声影响越来越引起建设单位、环保部门和公众的关注,已成为亟待解决的环境问题^[5-7]。这就必然导致需要提高变电站噪声控制标准,优化变电站噪声控制设计。

结合国内某交流 1 000 kV 特高压变电站的工程特点和环境特点,基于 Cadna/A 噪声预测软件对变电站本期及远期站界噪声进行了预测分析,结合预测结果和噪声排放标准,提出合理的噪声治理措施。

1 Cadna/A 噪声预测软件

Cadna/A 噪声预测软件是德国研发的利用

Windows 操作平台的噪声模拟和控制软件。该软件适用于工业设施、公路、铁路和区域等多种声源的影响预测、评价、工程设计与控制对策研究。经国家环保部环境工程评估中心认证,该软件理论基础与中国声环境影响评价的理论基础一致,可以作为中国声环境影响评价的工作软件。

所研究的噪声预测参数主要采用《环境影响评价技术导则——声环境》(HJ 2.4 – 2009)推荐的工业噪声预测模式进行厂界噪声预测时,以工程噪声贡献值作为评价量。

2 工程概况

2.1 变电站站址概况

拟建的 1 000 kV 特高压变电站站址地势平坦开阔,区域地势呈现东南高、西北低,场地海拔高程 1 008.50 ~ 1 098.50 m。工程场地内无崩塌、滑坡、泥石流、岩溶等不良地质现象,稳定性较好。站址不占用基本农田,占地性质主要为牧草地,场址处植被主要为大针茅、羊草、冰草和冷蒿等。站址 1 km 范围内无居民等环境敏感点分布。变电站站界执行《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB12348 –

表 1 设备的声功率级

编号	声源	类型	面积/m ²	高度/m	声功率级/dB(A)
1	1 000 kV 主变压器	面声源	50(4.75 m×10.65 m)	2.5	102
2	1 000 kV 高压电抗器	面声源	45(5 m×9 m)	2.5	104(320 Mvar)
3	低压电抗器	点声源	—	2.0	66

2008)中 2 类标准限值要求,即昼间≤60 dB(A),夜间≤50 dB(A)。

2.2 变电站建设规模

变电站本期建设规模:主变压器 2×3 000 MVA;1 000 kV 出线 2 回;1 000 kV 高压并联电抗器 1 组,即 1×3×320 Mvar;低压无功补偿 2 组,即低压并联电抗器 2×2×240 Mvar+低压电容器 2×1×210 Mvar。

变电站远期建设规模:主变压器 2×3 000 MVA;1 000 kV 出线 9 回;500 kV 出线 8 回;1 000 kV 高压并联电抗器 5 组,即 5×3×320 Mvar;低压无功补偿 8 组,即低压电抗器 8×2×240 Mvar+低压电容器 8×1×210 Mvar。

3 噪声预测

3.1 预测参数选取

特高压变电站噪声主要来源于电气设备噪声和设备电磁噪声,主要噪声源设备有 1 000 kV 主变压器、1 000 kV 高压并联电抗器、110 kV 低压电抗器及 110 kV 电容器、导线和金具等。电晕噪声通过对母线和金具的布置与设计进行优化,可有效控制;而 110 kV 站用电变压器、110 kV 串联电抗器、低压电抗器等,多位于变电站中部区域,且声功率级较低,运行时所产生的噪声远不如主变压器及高压并联电抗器的运行噪声,可忽略不计。因此,该变电站主要噪声源设备有:1)1 000 kV 主变压器(含冷却风扇);2)1 000 kV 高压并联电抗器;3)110 kV 低压并联电抗器。根据《特高压输电工程变电(换流)站可听噪声预测计算及影响评价技术规范》(国家电网公司特计划[2011]79 号),其声源源强取值见表 1 所示,站内主要建筑、具有隔声功能的防火墙等的高度见表 2。

表 2 噪声源本体及主要建筑高度

编号	设备名称	建筑物高度/m
1	围墙	2.3
2	主变压器防火墙	10.0
3	高压电抗器防火墙	8.5
4	主控楼	12.0
5	备品备件库	12.8
6	500 kV GIS 室	15.0
7	500 kV 继电器室	4.5
8	站用电室	4.5

变电站噪声预测时不考虑地面吸收及绿化树木的屏障衰减,也不考虑地形的衰减影响,因此,运用 Cadna/A 噪声预测软件按照表 1 中的声源对变电站本期和远期规模建立三维仿真模型。

3.2 未采取降噪措施时的噪声预测结果

通过 Cadna/A 软件模拟计算可知,在未采取降噪措施的情况下,变电站本期规模西南侧站界噪声最大值超过《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB 12348-2008)中 2 类标准(昼间<60 dB(A)、夜间<50 dB(A))要求;变电站远期规模站界四周噪声均超过《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB 12348-2008)中 2 类标准(昼间<60dB(A)、夜间<50dB(A))要求(见表 3)。

表 3 变电站本期和远期规模未采取措施的噪声预测结果

位置	本期规模站界噪声 预测值/d(A)	远期规模站界噪声 预测值/dB(A)
站界东北侧	46.6	51.2
站界东南侧	48.8	56.6
站界西北侧	39.9	63.8
站界西南侧	62.6	62.6

4 采取的噪声治理措施及效果

通过该变电站本期规模和远期规模(见表 3)未采取措施的噪声预测结果可知,该变电站 1 000 kV

主变压器(含冷却风扇)和110 kV 低压并联电抗器基本位于变电站站址中部区域,距离站界距离较远,其对站界噪声的贡献值较小;而1 000 kV 高压并联电抗器基本靠近围墙布置,对站界噪声的贡献值较大,因此,引起该变电站站界噪声超标的主要噪声源设备是变电站1 000 kV 高压并联电抗器,且布置在靠近围墙处。为了使变电站本期和远期规模站界噪声均达到《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB 12348-2008)2类标准(昼间<60 dB(A)、夜间<50 dB(A))要求,必须针对1 000 kV 高压并联电抗器采取噪声控制措施。

4.1 优化平面布置

本工程在设计阶段已尽可能将备品备件库、500 kV GIS 室和500 kV 继电器室靠近围墙布置,以控制主要噪声源设备噪声的传播途径为主要手段,优化站区内部总平面布置,达到治理噪声的目的。

4.2 采取隔声屏障措施

隔声屏障措施主要从两个方面考虑:1)在靠近主要噪声源的高压电抗器附近设置;2)在围墙上安装隔声屏障。鉴于隔声屏障主要是通过阻隔声波的传播途径来降低噪声,屏障越靠近噪声源强,其效果越佳,因此,本次隔声屏障措施考虑在高压电抗器靠近高抗防火墙处设置与防火墙相同高度(即8.5 m)的隔声屏障。通过Cadna/A 软件模拟预测,本期规模能够达到噪声控制标准要求,但远期规模很难达到噪声控制要求,故采用隔声屏障措施不可行。

4.3 采取高抗 Box-in 降噪措施

结合该变电站本(远)期规模及站界外环境特点,本期和远期站界噪声需对1 000 kV 高压并联电抗器采取Box-in 降噪(即采用可拆卸和带有通风散热消声器的隔音室把高压并联电抗器封闭起来,把套管、冷却器、风扇和压力释放器等放在隔音室的外面)措施,预测结果见表4。站外区域本期和远期规模昼间和夜间噪声均能满足《声环境质量标准》(GB 3096-2008)中2类标准(昼间<60 dB(A)、夜间<50 dB(A))要求。本变电站站界1 km 范围内无居民分布,故变电站噪声不会对站外居民造成干扰。

表4 变电站本期和远期规模采取措施后的噪声预测结果

位置	本期规模站界噪声 预测值/d(A)	远期规模站界噪声 预测值/dB(A)
站界东北侧	46.6	46.6
站界东南侧	47.0	47.4
站界西北侧	39.4	48.7
站界西南侧	47.3	47.7

5 结 语

通过对该拟建的1 000 kV 特高压变电站的噪声源分析、噪声分布预测结果分析及噪声控制方案比选,变电站采取“优化变电站总平面布置+1 000 kV 特高压并联电抗器Box-in”噪声控制方案后,本期和远期站界噪声均能满足相关标准要求。可见,在设计阶段利用Cadna/A 软件对1 000 kV 特高压变电站噪声影响进行模拟预测,可以评价特高压变电站噪声的污染状况,为建设项目的可行性提供相关的依据,并为环境影响评价提供更多的技术支持。

参考文献

[1] 赵遵廉. 中国电网的发展与展望[J]. 中国电力, 2004, 37(1): 4-5.

[2] 舒仰彪,张运洲. 优化我国能源输送方式研究[J]. 中国电力,2007, 40(11):4-8

[3] 舒仰彪. 1 000 kV 交流特高压输电技术的研究与应用[J]. 电网技术, 2005, 29(19):T1-T6.

[4] 张红霞,史玉柱,王佩华,等. 涉及自然保护区的跨区域电网建设项目应注意的几个问题[J]. 华中电力, 2011,24(4):29-32.

[5] 张新宁,杜祥庭,陈新龙. SoundPLAN 软件在特高压交流变电站噪声预测中的应用探讨[C]. 四川省首届环境影响评价学术研讨会论文集,2009:15-27.

[6] 李雪亮,徐振,周英,等. 1 000 kV 特高压变电站声环境影响仿真研究[J]. 环境工程技术学报,2012,2(3): 264-270.

[7] 段金虎,魏华杰. 基于 Cadna/A 软件的特高压变电站噪声模拟研究[J]. 资源节约与环保,2015,(9):157, 171.

作者简介:

陈晓琳(1986),硕士研究生,主要从事环境影响评价工作。
(收稿日期:2016-11-08)

直流接地极入地电流 在交流系统中的通路构成及计算方法综述

李 瑾¹,王渝红¹,梁晓斌²,刘天宇¹

(1. 四川大学电气信息学院,四川 成都 610065;
2. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610072)

摘 要:直流输电系统单极大地运行引起的变压器直流偏磁现象将影响电网的安全稳定运行,在选择直流偏磁抑制措施时,必须正确地计算交流电网中直流电流的分布。将交流电网直流电流分布计算方法进行了分类,并对各种计算方法的原理和模型进行了详细介绍;而后又从适用场合、计算精度、所需数据、模型复杂程度及是否适合用于分析变压器加装隔直装置的效果等几个角度分别对各种计算方法进行评价,最后对未来的研究方向提出了建议。

关键词:交流电网直流电流分布;直流偏磁;变压器中性点;高压直流输电

Abstract: The DC bias caused by monopolar ground return operation mode of HVDC system will affect the safe and stable operation of AC power grid. DC current distribution in AC power grid must be correctly and carefully calculated before taking the suppression measurement into consideration. Several DC current distribution calculation methods are classified and analyzed, and the theoretical fundamentals and mathematical models used in each method are introduced in detail. Differences in range of application, computational accuracy, required data, model complexity and whether the method is suitable for DC bias suppression equipment for transformer in AC substation are evaluated and compared thoroughly. Moreover, some suggestions on research directions in the future are given.

Key words: DC current distribution in AC system; DC bias; neutral point of transformer; HVDC

中图分类号:TM721 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2017)02-0034-07

0 引 言

高压直流输电具有距离远及输送容量大等优点,是一种经济高效的输电方式。但当直流系统以单极大地方式运行或双极不平衡运行时,将会通过直流系统接地极向地中注入较大的直流电流,在极址土壤中形成一个恒定直流电流场,这会导致大地电位绝对值升高、地面跨步电压和接触电势增大等负面效应。直流接地极电流引起的地电位分布改变,如两个变电站接地网之间存在电位差,就可能导致直流电流通过变压器中性接地点流入变压器绕组,引起变压器磁通、励磁电流的畸变以及变压器本体产生振动和噪声^[1-7],也就导致直流偏磁现象。

另外,当太阳剧烈活动时,将会引起地球发生地磁暴,这会导致地磁扰动(geomagnetic disturbance, GMD)^[8]的发生,从而使地表电位分布发生改变,在中性点接地变压器、输电线路和大地构成的回路中

产生地磁感应电流(geomagnetically induced current, GIC)^[8],同样会导致直流偏磁现象的发生^[9-10]。

直流偏磁发生时,将会影响变压器的运行,使其温度升高、损耗增加、噪声和振动加剧;同时系统的谐波增加、电压下降、继电保护误动作,严重时甚至会威胁到整个电网的安全稳定^[11-15]。因此,为了合理地估计直流偏磁电流的大小,以便采取正确的措施减小直流偏磁的危害,有必要研究交流系统中直流电流的分布情况。

由于地磁暴和直流系统单极大地运行对地电位分布的影响方式是不同的,因此在研究交流系统直流电流分布时需要区别对待^[9-10],下面主要综述了在直流系统单极大地运行时交流电网直流电流分布的计算方法。

1 交流电网直流电流分布的计算

交流电网直流电流的分布模型主要由地上模型

和地下模型共同构成。地上模型指的是地上交流输电网络模型,为电路模型,包括线路模型和变压器模型;地下模型则指的是地下土壤模型,为电场模型。

目前,已有许多学者对交流电网的直流电流分布进行了研究,并提出了多种计算方法。下面将这些方法根据土壤模型建立方法的不同,分为构建电场-电路网络计算的方法和等效为纯电阻网络计算的方法。构建电场-电路网络的计算方法是建立详细的地上交流系统直流电阻网络和地下土壤电场网络,通过矩量法、有限元法及边界元法求解土壤模型的格林函数^[16]得出地表电位分布等参数,再结合地上电阻网络综合分析计算得出交流电网直流电流分布的计算方法。等效为纯电阻网络计算的方法是指将土壤电场网络等效为电阻网络,通过中性点接地的变压器将地上网络和地下网络耦合起来形成一个纯电阻网络,再使用电路理论来计算交流系统中直流电流分布的计算方法。

由于精确的交流系统直流网络参数容易从调度部门获取;同时接地极的形状对接地电阻计算结果影响较小^[17];因此交流电网直流电流分布的计算精度主要由所建立的土壤模型的精度决定。

下面主要从单个直流通地极系统单极大地运行的情况来介绍交流系统直流电流分布的计算方法。

2 构建电场-电路网络的计算方法

构建电场-电路网络的计算方法主要包括基于经典接地极理论计算直流电流分布、复合分层土壤模型下计算直流电流分布、半岛地质条件下计算直流电流分布和考虑复杂埋地网络计算直流电流分布4种方法。其中的经典接地极理论计算直流电流分布的方法在计算常规交直流系统的直流偏磁计算中有着广泛的应用。构建电场-电路网络中最重要的是正确建立电场模型。

2.1 经典接地极理论计算直流电流的分布

在使用经典接地极理论进行地中直流电流分布的计算时,首先要基于土壤的导电参数,使用有限元法和边界元法建立土壤电流场分布模型,计算出地表电位;再根据交流网络的地理位置及其直流网络参数计算出直流电流分布,而这些直流电流反过来又将影响地下电流场的分布,因而需要对电路和电场进行反复迭代计算,在这种反复交替迭代计算出

的数值收敛后,最终得到地表电位分布^[18]。目前常用来计算直流偏磁的 CDEGS 软件就是基于该原理。

在建立电场模型时,考虑到地球的构造,通常对大地采取水平分层处理,即用格林函数建立土壤电阻率分层模型^[18]。使用有限元法得到的大地水平分层模型为^[19]

$$\frac{\partial}{\partial x}(\delta \frac{\partial \varphi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y}(\delta \frac{\partial \varphi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\delta \frac{\partial \varphi}{\partial z}) = f(x, y, z) \tag{1}$$
$$\varphi|_{s_1} = 0, \frac{\partial \varphi}{\partial n}|_{s_2} = 0 \tag{2}$$

式中: s_1 为无穷远处的边界; s_2 为大地与空气的接触边界; φ 为电势; δ 为电导率的函数; f 为电源位置的函数。

土壤结构对交流电网直流电流的分布影响较大,土壤分层越细致,计算结果越精确^[20]。文献[21]给出了任意层格林函数的通用理论表达式,并推导了垂直分层土壤的格林函数表达式。但当土壤层数多于3层时,格林函数的表达式将变得十分复杂^[22-23],计算极易出错。

经典接地极理论作为最常用的计算直流系统单极大地运行方式下交流电网中直流电流分布的方法,具有较高的计算精度,也非常适合分析加装直流抑制装置的效果。由于该方法仅对土壤进行水平分层,因此更适合于地质条件较为均一的情况,否则将产生较大的误差。该方法建立的模型并不复杂,但需要收集精确的土壤分层情况以及各层的土壤电阻率数据。

2.2 复合分层土壤模型下计算直流电流分布

仅进行水平分层的土壤模型无法考虑山川、河流、海洋等因素对交流系统直流电流分布的影响。为了正确计算以上因素对系统的影响,建立的土壤模型不仅要进行水平分层,还要进行垂直分层。

文献[24]认为交流系统平均地表电位的作用有限,可以忽略,因此在计算交流系统中直流电流分布时,仅需根据求得的地表电位分布直接带入地上电阻网络进行计算,即可得到交流网络中直流电流的分布。计算时,该文对土壤进行了水平分层和垂直分层,并根据其格林函数,通过镜像法推导出了在水平分层、垂直分层及复合分层土壤结构中地表电位的解析公式。

对于水平双层土壤结构,电流源在第 1 层土壤中,坐标为 (x_0,y_0,z_0) ;地面任一点坐标为 $(x,y,0)$;第 1 层土壤的电阻率为 ρ_1 ,厚度为 H ;第 2 层土壤的电阻率为 ρ_2 。泰勒级数展开后地表电位为^[24]

$$V_p=\frac{\rho_1 I}{4\pi}\left\{\begin{aligned}&\left[\frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2}}+\right.\\&\left.\frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z+z_0)^2}}+\sum_{n=1}^{\infty}k^n\cdot\right.\\&\left.\frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-2nH+z_0)^2}}+\right.\\&\left.\frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z+2nH-z_0)^2}}+\right.\\&\left.\frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z+2nH+z_0)^2}}\right]\end{aligned}\right\}\quad(3)$$

式中, $k=\frac{\rho_2-\rho_1}{\rho_2+\rho_1}$ 。

对于垂直双层土壤结构,电流源在左侧土壤中,坐标为 (x_0,y_0,z_0) ,距地面 z_0 ,距分界面 V ,地面任一点坐标为 $(x,y,0)$;左、右侧土壤电阻率分别为 ρ_1 、 ρ_2 。泰勒级数展开后左边的地表电位为^[24]

$$V_{p'}=\frac{\rho_1 I}{4\pi}\left\{\begin{aligned}&\left[\frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2}}+\right.\\&\left.\frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z+z_0)^2}}\right]+\\&k\cdot\left[\frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-2nH+z_0)^2}}+\right.\\&\frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z+2nH-z_0)^2}}+\\&\frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-2nH-z_0)^2}}+\\&\frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z+2nH+z_0)^2}}\end{aligned}\right]\quad(4)$$

式中, $k=\frac{\rho_2-\rho_1}{\rho_2+\rho_1}$ 。

对于图 1 所示的复合土壤模型,地表电位为^[24]

$$V=V_L+k'V_0\quad(5)$$

式中: V_L 为所有陆地电源点的作用,令式(3)中 $H=H_1$ 即得 $k'=\frac{\rho_3-\rho_1}{\rho_3+\rho_1}$, ρ_3 为海洋的电阻率; V_0 为海洋层中所有电源点的作用,将式(3)中的 x_0 用 (x_0+2H_2) 代替,且令 $H=H_1$ 即得。

该方法建立了详细的计算地表电位分布的土壤模型,推导出了精确的地表电位计算公式,适合于计

算包括山川、河流、海洋等特殊地质环境下交流系统中的直流电流。由于给出了地表电位分布公式,因此当收集到了详细的地下网络参数,计算将非常简便快捷。但该方法忽略了地上交流系统的直流电流对地下电场分布的影响,这将引入较大的误差,因此这种方法仅适合用于估计交流系统中直流电流的分布,并不适合于分析变压器加装直流电流抑制装置的效果。

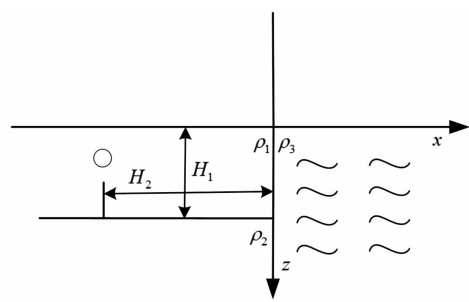


图 1 复合土壤结构

2.3 半岛地质条件下计算直流电流的分布

文献[25]详细介绍了半岛地质条件下交流系统中直流电路的分布计算方法。这种计算方法与考虑复杂埋地网络的计算方法类似,都是先计算地表电位分布,而后再将地表电位分布数据直接带入交流系统直流电阻网络进行直流电流的分布计算,未考虑交流系统中的直流电流对地表电位分布的影响。

在计算地表电位分布时,将三维空间转化为二维空间,并结合保角变换法,推导出了半岛地质条件下地表电位分布的表达式。

对于如图 2 所示的半岛陆地水平双层土壤模型,在接地极直流电流作用下其地表任一点 $(r,\theta,-H)$ 的电位为^[25]

$$\begin{aligned}\varphi_{d1}(r,\theta,-H) &= V_{d1}(r,\theta-H) + V'_{d1}(r,\theta-H) + \\&\sum_{n=1}^{\infty}\gamma_1^n[V_{i1}(r,\theta-H) + V_{i2}(r,\theta-H) + \\&2V_{i3}(r,\theta-H)] + \gamma_2\{V_{d2}(r,\theta,-H) + \\&V'_{d2}(r,\theta-H) + \sum_{n=1}^{\infty}\gamma_1^n[V'_{i1}(r,\theta-H) + \\&V'_{i2}(r,\theta,-H) + 2V'_{i3}(r,\theta-H)]\}\end{aligned}\quad(6)$$

式中: $\gamma_1=\frac{\rho_2-\rho_1}{\rho_2+\rho_1}$; $\gamma_2=\frac{\rho_0-\rho_1}{\rho_0+\rho_1}$; ρ_0 、 ρ_1 、 ρ_2 分别为海水、上层土壤和下层土壤的电阻率; V_{d1} 、 V'_{d1} 、 V_{i1} 、 V_{i2} 、 V_{i3} 及 V_{d2} 、 V'_{d2} 、 V'_{i1} 、 V'_{i2} 、 V'_{i3} 分别为接地极及其各镜像在场点产生的电位。

该方法建立了详细的地下电场模型,得出了精确的地表电位计算公式,特别适合于计算半岛等特殊地质环境下交流系统中的直流电流分布,若收集到了详细的地下网络参数,计算将非常快捷。但该方法同样忽略了地上交流系统的直流电流对地下电场分布的影响,将引入较大误差,故此方法仅适合于估计交流系统中直流电流的分布,不适合于分析变压器加装直流电流抑制装置的效果。

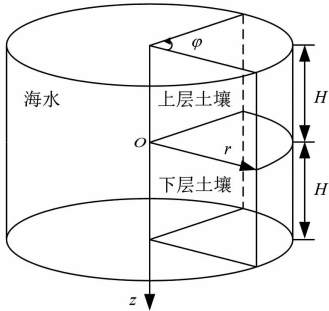
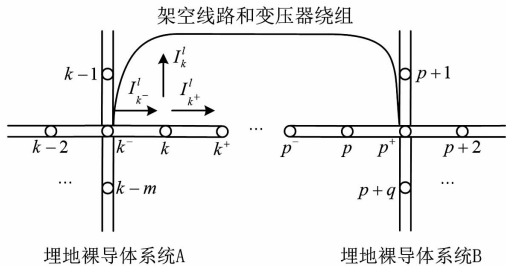


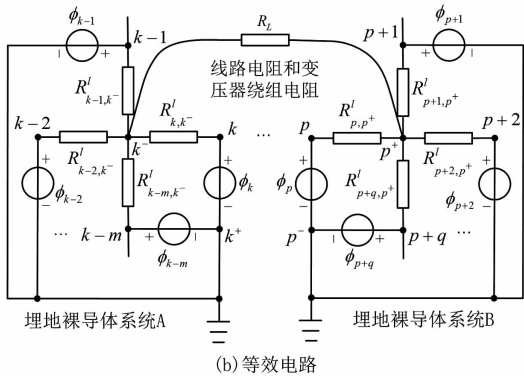
图 2 半岛陆地水平双层土壤模型

2.4 考虑复杂埋地网络计算直流电流的分布

文献[26-28]中认为交流系统中直流电流的源是由埋地导体产生的电场,埋地导体主要包括直流接地极、交流变电站接地网和其他金属物体等。基于此思想,将埋地导体分段,并使用矩量法进行分析,得出了直流系统大地运行时交流系统直流电流分布的数值计算方法。



(a) 交流网络与埋地导体连接示意图



(b) 等效电路

图 3 埋地裸导体系统与交流系统构成的电路网络
由埋地导体与地上交流系统直流电阻构成的某

个电路网络如图 3(a)所示,其等效电路为图 3(b)。图中: $k^-、p^+$ 为导体段的交点; $k-i、p+j(i=0,\cdots,m;j=0,\cdots,q)$ 为各导体段的中点; $R^l_{k-i,k^-}、R^l_{p+j,p^+}(i=0,\cdots,m;j=0,\cdots,q)$ 为各导体段中点与节点之间的自电阻; $\varphi_{k-i}、\varphi_{p+j}(i=0,\cdots,m;j=0,\cdots,q)$ 为各导体段中点处的电位。

各导体段的漏电流 I^n 及中点电位 φ_k 为^[28]

$$I^n = [2G^lR - G^l(A_1 + A_2)G^{-1}G^lR - E]^{-1} \times G^l(A_1 + A_2)G^{-1}I^s \tag{7}$$

$$\varphi_k = RI^n \tag{8}$$

式中: I^s 为注入的直流电流列向量; G 为节点电压方程对应的电导矩阵; G^l 为各节点与各导体段间的电导构成的矩阵; R 为由各导体段间的转移阻抗构成的矩阵; $A_1、A_2$ 为各节点同各导体段首末端的关联矩阵。

将求得各导体段上的漏电流及中点电位代入图 3(b)电路即可计算出交流系统中直流电流分布。

该方法适合于拥有多种类型接地系统的情况,也适合于分析变压器加装直流电流抑制装置的效果。该方法需要对复杂的埋地系统进行建模,而且考虑了土壤分层的情况,因此所建立的模型非常复杂,但计算结果具有较高的精度。

3 等效为纯电阻网络的计算方法

该类方法中的等效地下电阻网络目前存在多种构成方法,主要分为 3 类:用极自电阻和耦合电阻构成的网络^[17-18]、用直流极与变电站间的互阻、变电站间的互阻和接地电阻构成的网络^[24-25,29]以及用变压器接地极与直流接地极之间等效阻抗构成的网络^[19]。

3.1 用极自电阻、耦合电阻构成的地网等效模型

文献[19]通过引入极自电阻和耦合电阻的概念,将地网等效为仅包含极自电阻和耦合电阻的电路网络,并起名为网络算法,其原理如图 4 所示。图中:极自电阻 R^0_i 表示由该接地极 i 与无穷远处散流通道所决定的电阻值;耦合电阻 R_{ij} 表示由接地极 i 和接地极 j 之间导电通道所决定的电阻值。

通常情况下,极自电阻取为真值电阻,耦合电阻可使用静电比拟法及等效表面积法进行计算^[29]。文献[30]推导出了耦合电阻的计算公式。文献[31]分析了极自电阻和耦合电阻与自电阻和互电

阻^[30-32]的关系,可根据自电阻和互电阻参数得出相应的极自电阻和耦合电阻参数。

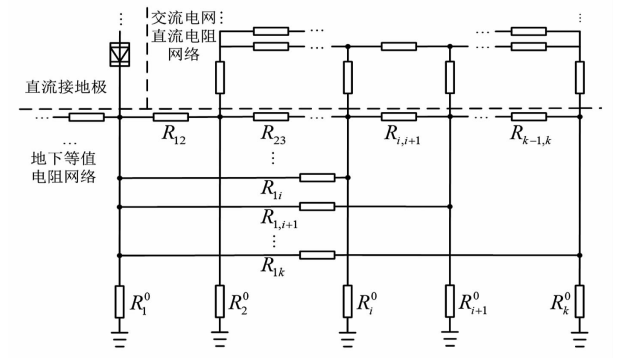


图 4 网络算法原理图

基于场路耦合原理,将复杂的地下电场网络等效为由极自电阻和耦合电阻构成的纯电阻网络,模型简单,并通过仿真表明其计算结果较为准确。由于该方法无需考虑地质构造,因此适合于任何土壤结构的分析,同时该方法也特别适合于变压器加装隔直装置的效果分析。

3.2 用直流极与变电站间的互阻、变电站间的互阻和接地电阻构成的地网等效模型

文献[27]利用互电阻的概念,建立了直流极与变电站的互阻矩阵和变电站间的互阻矩阵,并用变电站的接地电阻、直流极与变电站的互阻矩阵和变电站间的互阻矩阵建立了地网等效模型,如图 5 所示。

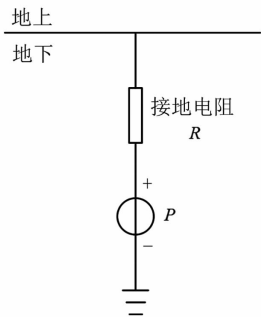


图 5 变电站地下模型

变电站的地表感应电位为^[33]

$$P = MI_D + NI_A \tag{9}$$

式中: M 为直流极与变电站间的互阻矩阵; N 为变电站间(不包括自身作用的互阻抗矩阵); I_D 为直流极入地电流; I_A 为变电站中性点直流电流。

文献[34]用复镜像法计算了直流极与变电站的互阻矩阵和变电站间的互阻矩阵,并通过仿真验证了其有较高的精确度。文献[35]中提出了用复镜像拟合的方法来计算多层土壤情况下直流极与变电站的互阻矩阵和变电站间的互阻矩阵,并将其公

式化,通过仿真证明了该公式的准确性。

同样基于场路耦合原理,把复杂的地下电场网络等效为由接地电阻、直流极与变电站间的互阻和变电站间的互阻构成的纯电阻网络,适合于所有地质情况以及加装隔直装置效果的分析。模型搭建简单,计算简便且结果较准确。但直流极与变电站的互阻矩阵和变电站间的互阻矩阵的参数不易得到。

3.3 用变压器接地极与直流接地极之间等效阻抗构成的地网等效模型

文献[15]提出了一种利用变压器接地极与直流接地极之间等效阻抗表示的地网等效模型。先根据交流电网的直流电阻模型以及变压器中性点直流电流大小求出变压器接地点电位,再根据 $U_i = R_i I$ 求得 R_i , 式中: U_i 为变压器接地点 i 的电位; I 为直流接地极流入大地的电流, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

该方法的计算模型非常简单,计算时所需的参数很少且容易获得,并且对大地构造没有限制。但由于计算得出的地下模型参数是随着地上网络模型及参数的改变而改变的,因此仅适合于地上网络固定不变的情况。若地上网络发生改变,必须重新计算地下网络参数,否则可能会产生较大计算误差,故并不适合于变压器加装直流抑制装置的效果分析。

4 交流电网直流电流分布的计算方法比较

在进行交流电网直流电流分布的计算方法比较时,主要依据以下 5 个原则:1) 计算的适用场合;2) 计算结果的精确度;3) 所需收集的数据;4) 建立模型的复杂程度;5) 是否适合用于分析变压器加装隔直装置的效果。

总的来说,构建电场-电路网络的方法和等效为纯电阻网络的方法相比:前者中基于经典接地理论计算直流电流分布的方法和考虑复杂埋地网络的直流电流分布计算方法,建立了详细的土壤模型,准确地反应了实际大地中的电场分布情况,在土壤数据准确且全面的情况下,计算结果更加精确。但复合分层土壤模型下直流电流分布的计算方法和半岛地质条件下直流电流分布的计算方法,都未考虑电流网络和电场网络间的相互影响,因而计算结果有较大的误差;而后者将土壤模型等效为由数量有限的电阻构成的网络,再与地上电阻网络相耦合,计算结果误差较小,大大简化了计算,模型简单,且不必

表 1 各种交流电网直流电流计算方法比较

分类	计算模型名称	适用场合	计算精度	所需数据	模型复杂程度	是否适合用于分析变压器加装隔直装置的效果
电场 - 电路耦合法	经典接地极理论	土壤分层均匀	精确	土壤分层信息、各层土壤的电阻率	复杂	适合
	复合分层土壤模型	山川、河流、海洋等不均匀分层土壤	误差较大	地质构成分界信息及其电阻率	非常复杂	不适合
	半岛模型	半岛	误差较大	地质构成分界信息及其电阻率	非常复杂	不适合
	复杂埋地网络模型	包含多种类型接地系统	准确度高	各埋地导体段的电导、土壤分层信息及其电导率	非常复杂	适合
等效纯电阻法	由极自电阻、耦合电阻构成的地网等效模型	任何场合	一般	各中性点接地变压器的直流接地电阻值、耦合电阻值	简单	适合
	由直流极与变电站之间的互阻、变电站间的互阻和接地电阻构成的地网等效模型	任何场合	一般	直流极与变电站之间的互阻矩阵、变电站间的互阻矩阵、各中性点接地变压器的接地电阻	简单	适合
	由变压器接地极与直流接地极之间的等效阻抗构成网等效模型	地上交流网络参数固定不变	一般	各中性点接地变压器的中性点直流电流	非常简单	不适合

收集土壤参数,但是该方法在计算时将电场网络等效为电路网络时将引入部分误差。

各方法的仿真结果也印证了以上理论分析:文献[24]使用复合分层土壤模型对三广直流单机大地运行时变压器接地中性点直流电流进行仿真计算,得到的仿真值和测量值之间的相对误差的平均值为 9.907%;文献[26]使用复杂埋地网络模型计算出的春城主变压器中性点直流电流的相对误差为 9.855%;文献[31]使用由极自电阻、耦合电阻构成的地网等效模型仿真出的葛一上直流及三上直流单极运行的各变压器中性点直流电流值与测量值间的相对误差的平均值为 5.786%;文献[21]使用由直流极与变电站之间的互阻、变电站间的互阻以及接地电阻构成的地网等效模型,对楚穗直流单极运行时各变电站中性点直流电流计算得出的仿真值和测量值间相对误差的平均值为 35.288%。造成文献[26]中的计算误差较小,与分析不符的原因是仿真模型中涉及的几个变电站的地表电位非常接近,这使得电流网络和电场网络之间的相互影响表现得不明显,从而使误差降低,但这只是个例,并不具有普遍性。

综合比较各计算方法的适用场合、计算精度、所

需数据、模型复杂程度及是否适合用于分析变压器加装隔直装置的效果,结果见表 1。

5 结 语

从直流系统单极大 地运行时交流电网直流电流分布的模型构建出发,分析了多种交流电网直流电流分布的计算方法,并详细比较了各种方法的优缺点。针对当前直流偏磁现象的研究情况,应结合实际工程的需求,充分发掘各种影响交流电网中直流电流分布的因素,并在计算时予以定量考虑,以便更加准确全面地掌握交流电网直流分布的情况,为直流偏磁抑制装置的选取提供更加全面的参考。

参考文献

[1] 董霞. 变压器直流偏磁研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.

[2] Siti R m, Hassan S, Anuar M N K. Study the Harmonic Characteristics of DC Bias on the Single Phase Power Transformer[C] // 2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2012), Melaka, Malaysia, 2012: 501 - 504.

[3] 王明新, 张强. 直流输电系统接地极电流对交流电网

- 的影响分析[J]. 电网技术, 2005, 29(3): 9-14.
- [4] Liu Qu, Zheng Jianchao, Li Licheng. Study on DC Current on Transformers During HVDC Systems Operated in Ground - return Mode[C]. Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, Beijing, China, 2005.
- [5] 赵杰, 曾嵘, 黎小林, 等. HVDC 输电系统中直流对交流系统的影响及防范措施研究[J]. 高压电器, 2005, 41(5): 324-329.
- [6] 蒯狄正, 万达, 邹云. 直流输电地中电流对电网设备影响的分析与处理[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(2): 81-82.
- [7] 梅桂华, 徐柏榆, 王晓毛, 等. 直流输电对交流系统变压器的影响[J]. 广东电力, 2006, 19(1): 1-7.
- [8] Bolduc L, Langlois P, Boteler D H, et al. A Study of Geomagnetic Disturbance in Quebec II: Detailed Analysis of a Large Event[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4): 1251-1256.
- [9] IEEE Transmission and Distribution Committee Working Group. Geomagnetic Disturbance Effects on Power Systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(3): 1206-1216.
- [10] Albertson V D. Solar - induced - current in Power System; Causes and Effects [J]. IEEE Transactions on PAS, 1973, 92(1): 471-477.
- [11] Girgis R, Vedante K. Effects of GIC on Power Transformers and Power Systems[C] // Transmission and Distribution Conference and Exposition (T & D), [S. l.]: IEEE, 2012: 1-8.
- [12] Lahtinen M, Elovaara J. GIC Occurrences and GIC Test for 400 kV System Transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(2): 555-561.
- [13] Bozoki B, Chano S R, Feero W E, et al. The Effects of GIC on Protective Relaying[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 725-739.
- [14] 郑涛, 陈佩璐, 刘连光, 等. 地磁感应电流对电流互感器传变特性及差动保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(22): 84-89.
- [15] IEEE Transmission and Distribution Committee Working Group on Geomagnetic Disturbances and Power System Effects. Geomagnetic Disturbance Effects on Power Systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(3): 1206-1216.
- [16] 鲁志伟. 大型接地网工频接地参数的计算和测量[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
- [17] 曹昭君, 何俊佳, 叶会生, 等. 直流系统大地运行时交流系统直流分布的计算[J]. 高电压技术, 2006, 32(10): 82-84.
- [18] 马志强, 黎小林, 钟定珠. 直流输电大地电流对交流系统影响的网络分析算法[J]. 广东电力, 2005, 18(12): 4-8.
- [19] 陆继明, 肖东, 毛继雄. 直流输电接地极对地表电位分布的影响. 高电压技术, 2006, 32(9): 55-58.
- [20] 何俊佳, 叶会生, 林福昌, 等. 土壤结构对流入变压器中性点直流电流的影响[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(36): 14-18.
- [21] 潘卓洪, 张露, 谭波, 等. 水平层状土壤接地问题的理论推导与数值分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 860-866.
- [22] Lagace P J, Vuong M H, Lefebvre M, et al. Multilayer Resistivity Interpretation and Error Estimation Using Electrostatic Images[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 21(4): 1954-1960.
- [23] Bo Z, Xiang C, Lin Li, et al. Parameter Estimation of Horizontal Multilayer Earth by Complex Image Method [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1394-1401.
- [24] 刘曲, 李立涅, 郑健超. 复合土壤模型下 HVDC 系统单极大地运行时的电流分布. 中国电机工程学报, 2007, 27(36): 8-13.
- [25] 李长云, 李庆民, 李贞, 等. 半岛地址条件下计算高压直流输电地中直流分布的扩展镜像法[J]. 高电压技术, 2011, 37(2): 444-452.
- [26] 曾嵘, 张波, 赵杰, 等. HVDC 地中直流对交流系统的影响及规律分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(3): 678-682.
- [27] 曾嵘, 赵杰, 尚春, 等. HVDC 地中直流对交流系统影响的防范措施[J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 919-925.
- [28] 张波, 赵杰, 曾嵘, 等. 直流大地运行时交流系统直流电流分布的预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(13): 84-88.
- [29] 魏畅. 直流输电接地极电流场的直流通路网络建模与分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2008: 4-20.
- [30] 杜松怀. 接地技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- [31] 全江涛, 谢志成, 陈科基, 等. 特/超高压直流输电系统单极运行下变压器中性点直流电流分布规律仿真分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 787-793.
- [32] 陈先禄, 刘渝根, 黄勇. 接地[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2002.
- [33] 潘卓洪, 张露, 谭波, 等. 高压直流输电入地电流在交流电网分布的仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(21): 110-115.
- [34] 于永军, 杨琪, 侯志远, 等. 天中直流入地电流对新疆哈密地区交流电网的影响[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2298-2303.
- [35] 阮羚, 文习山, 康钧, 等. 考虑深层大地电阻率的交流系统直流网络模型[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2888-2893.

作者简介:

李 瑾(1991), 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制。 (收稿日期: 2016-11-27)

光学传感技术在输电走廊滑坡 在线监测中的研究及应用

刘 勇¹, 薛志航²

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

摘 要:为提升电网对地质灾害的监测及防护水平,对基于光学传感技术的输电走廊滑坡在线监测方法进行了研究,并在某 500 kV 输电线路 313 号和 314 号塔进行了现场应用。根据大量现场勘察数据,针对性地制定了科学有效的监测方案,搭建了一套基于光纤传感网络的在线监测平台,并且分析了降雨量、倾斜角和表面裂缝与滑坡体状态的关联;最后依据获取的监测数据对某 500 kV 输电线路 313 号和 314 号塔进行了诊断,诊断结果表明其具有较高的实时性和准确性。

关键词:光纤传感;滑坡;降雨量;倾斜角;表面裂缝;诊断

Abstract: In order to improve the monitoring and protection level of geological disasters in power grid, online landslide monitoring method is studied for transmission line corridor based on fiber optic sensing technology, and the research results is applied to No. 313 and No. 314 tower of a 500 kV transmission line. According to plenty of site survey data, a scientific monitoring program is developed, an online monitoring system is set up and the relationship between rainfall, tilt angle, crack and landslide status is analyzed. At last, No. 313 and No. 314 tower of a 500 kV transmission line are diagnosed according to the monitoring data, and the results show that the system is more timely and accurately.

Key words: fiber optic sensing; landslide; rainfall; tilt angle; crack; diagnosis

中图分类号: TM726 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)02-0041-05

0 引 言

随着人类社会经济与科学技术的发展,电力系统的正常运行,直接关系到社会稳定、经济发展和人民生活。但是,由于山区输电线路常常受到山地灾害的威胁,特别是汶川地震以后,地质环境找到严重破坏,对电网的安全提出了严峻的挑战,电网安全生产问题引起了社会的高度关注。由于中国 70% 属于山地环境,地形地貌和地质构造条件非常复杂,泥石流、滑坡、崩塌等各种山地灾害时有发生,对电网系统造成的破坏较为突出,地质灾害导致的电网大面积停电风险始终存在,这给当地社会及经济繁荣造成很大的威胁。

根据统计,四川省的输电通道主要受到滑坡灾害的影响。比如 500 kV 跨区电网二滩—自贡输电线路自投运以来十几年来,几乎每年都会发生因滑坡引起的输电线路设备损坏事件并使线路被

迫停运改造。其中 2000 年 7 月,西昌地区发生滑坡造成二普 III 线 N205 铁塔倒塌,并将相邻铁塔折断,共造成倒塔 6 基,铁塔损坏 3 基。在该耐张段内的导线、绝缘子及金具全部损坏,在后期治理过程中,地质滑坡又造成该段铁塔移位 1 次,改线 2 次,经济损失巨大。

目前电力系统针对地质灾害的频发,也采取了一些监测和应对手段,并在部分存在灾害隐患的杆塔搭建了在线监测平台,但由于铁塔所在自然环境恶劣,长期出现雨雪天气,且电磁干扰严重,经常导致传统电学传感器失效,数据无法及时回传,监测效果并不理想。

这里介绍了一种基于光纤传感技术的铁塔滑坡监测系统,解决了恶劣自然环境和强电磁干扰下数据监测的稳定性和可靠性,并针对存在滑坡隐患的某 500 kV 输电线路 313 号和 314 号塔进行了现场应用,以改善目前电网对地质灾害的监测及防护水平。

1 光纤监测技术原理简介

由于现场监测环境恶劣且电磁干扰严重,项目采用光纤传感器进行监测,与电测量原理的传统传感器相比,光纤光栅传感器有以下优点^[1]:

- 1) 不受潮湿环境影响,能避免电磁场的干扰,电绝缘性好,耐腐蚀,耐高温,能够有效地防止雷击、电磁干扰等;
- 2) 耐久性好,具有抵抗包括高温在内的恶劣环境及化学侵蚀的能力;
- 3) 质量轻,体积小,对结构影响小,易于布置,容易加工;
- 4) 既可以实现点测量,也可以实现分布式测量,组成复用系统,便于成网。

光纤传感器通常由光源、传输光纤、传感元件或调制区、光检测等部分组成。其工作原理是基于光纤的光调制效应,即光纤在外界环境因素(如温度、压力、电场、磁场等)发生改变时,其传光特性(如相位与光强)会发生变化的现象。也就是说,如果能测出通过光纤的光相位和光强的变化特点,就可以



图1 光纤传感器的原理结构图

知道被测物理量的变化过程^[2]。光纤 Bragg 光栅是指单模掺锗光纤经紫外光照射成栅技术而形成的全新光纤型 Bragg 光栅。成栅后的光纤纤芯折射率呈现周期性分布条纹并产生 Bragg 光栅效应。对于光纤 Bragg 光栅,当宽带光在 FBG 中传输时,将产生模式耦合,满足 Bragg 条件的一个窄带光谱将被反射回来。Bragg 条件为

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \tag{1}$$

式中: λ_B 为 Bragg 波长; n_{eff} 为光纤芯区的有效折射率; Λ 为光纤 Bragg 栅格周期。

当光纤光栅测量的参数发生改变时,会导致光纤光栅 n_{eff} 或 Λ 的改变,从而引起光纤光栅反射波长 λ_B 的变化。因此通过测量光纤光栅的中心反射波长的变化,即可获得待测物理量的变化情况。中心波长的获取及工作原理如图2所示。

宽带光源发出的光经过耦合器入射到光纤光栅

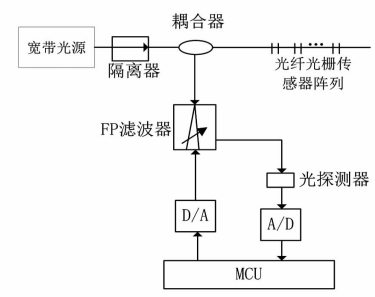


图2 光纤光栅传感原理图

传感器阵列,被各光纤光栅反射,经过耦合器后传输到 FP(Fabry Perot) 滤波器。当探测器探测到光信号时,滤波器的透射波长即为光纤光栅的反射波长。

当 FBG 同时受到变化的监测量和变化的温度作用时,光纤 Bragg 光栅的波长变化量为 $\Delta\lambda_B$, 则

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_c) \Delta\epsilon_f + (\alpha_s + \zeta_s) \Delta t \tag{2}$$

式中: P_c 为有效的光弹性系数; $\Delta\epsilon_f$ 为 FBG 变化的环境量; α_s 为光纤的热膨胀系数; ζ_s 为热光系数; Δt 为温度变化量。且有

$$P_c = \frac{n_{eff}^2}{2} ((1 - \nu) P_{12} - \nu P_{11}) \tag{3}$$

式中: ν 为纤芯材料的泊松比; P_{11} 和 P_{12} 为光弹性张量的普克尔系数。

传感器的中心波长是通过光纤光栅传感分析仪进行解调,转换为数字信号。其工作原理如下:

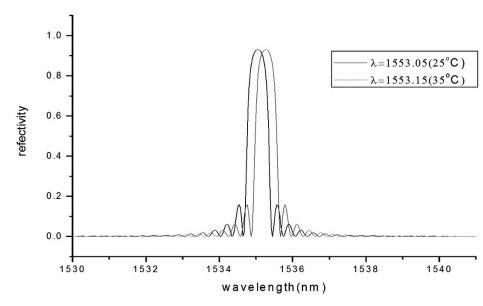


图3 光纤解调仪中心频率变化实例

系统工作时,光纤光栅传感分析仪内部光源发出连续的宽带光,经光缆传输到监测现场布设的光纤光栅传感器,这些传感器内部的测量敏感元件——光纤光栅对该宽带光有选择地反射回相应的一个窄带光,经同一传输光缆返回到光纤光栅传感分析仪内部探测器来测定出各个传感器所返回的不同窄带光的中心波长,从而解析出各监测点的值,如图3所示。由于多个传感器所返回的窄带光信号中心波长范围不同,所以可以将这些传感器串接组网实现多点同时测量,大大简化了传感器及引出线的

布设,避免了以往逐点测量的不便。

2 某 500 kV 输电线路 313 号和 314 号塔滑坡情况

2.1 滑坡塔位概况

某 500 kV 输电线路 313 号和 314 号塔位于昭觉县解放沟乡,于 1998 年 7 月 20 日正式投入运行。

由于省道 307 线西昌川兴至昭觉县城段改建公路的坡脚开挖、持续强降雨等因素,导致 313 号塔位下方坡体变形和 314 号塔位下方坡体变形滑动,威胁斜坡体后缘的 313 号、314 号塔铁安全。

2.2 区域地质环境

314 号塔位滑坡和 313 号塔位变形体位于昭觉县解放沟乡,坐标位置: N 27°52'26", E 102°33'51"。滑坡位置位于西昌川兴至昭觉县城段改建公路桩号 K46 + 470 至 K46 + 620 处,如图 4 所示。滑坡所处的地貌单元为中山地貌,以构造作用为主,受到强烈的剥蚀作用和局部的冰雪作用;出露地层岩性为白垩系下统阜新组(K1f),岩性以褐灰色紫色砾岩为主,夹有灰色、灰黑色砂岩、泥岩,局部含薄煤层和炭质泥岩,基岩产状近水平 $93^{\circ} \angle 3^{\circ} \sim 8^{\circ}$;构造上受安宁河断裂带及其支断裂影响,岩层结构面比较发育。因此,该区域山地灾害的易发性较强,易发生小到中等规模的基覆交界面堆积层滑坡灾害。

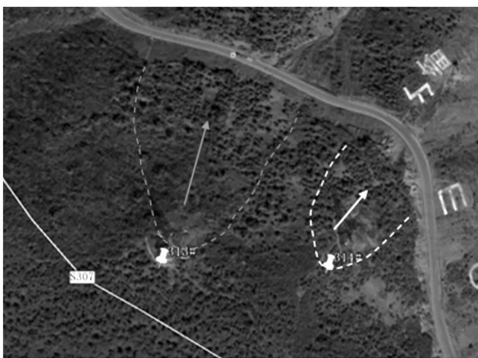


图 4 塔位变形体遥感示意图

2.3 314 号塔位变形体特征

314 号塔位滑坡发生于 2015 年 8 月 28 日。滑坡后缘海拔高度约 3 020 m,滑坡主滑方向约 NE 72°,滑坡剪出口位于前方公路附近,海拔高度约 3 000 m,滑坡相对高差约 20 m。314 号塔位于山脊末端临近公路,山体坡度约 30° ~ 40°,塔腿距公路边界最近距离 42 m,滑坡后 B 腿距滑坡体边缘 4.7 m。

据调查,滑坡已经发生整体滑动,滑坡后壁、侧壁明显,在滑坡中部和后部有大量拉张裂缝,裂缝宽度约 0.1 ~ 0.3 m,长约 10 ~ 20 m,深度约 0.2 ~ 0.5 m,走向基本垂直于主滑方向,约 NW 10° ~ 15° (见图 5)。



图 5 314 号塔位滑坡体上的拉张裂缝

2.4 313 号塔位变形体特征

313 号塔位距离原 K46 + 575 至 K46 + 620 滑坡后缘约 50 m。由于下方滑坡导致 313 号塔位斜坡稳定性下降,产生牵引,在后缘形成明显的拉裂缝。据调查,位于 313 号塔位下方约 5 m 处的山体出现拉张裂缝。目前裂缝长约 20 ~ 30 m,宽约 10 ~ 20 cm,深 50 cm (见图 6)。调查人员根据裂缝走向开展调查,裂缝走向从约 NW 330° 逐步变化为约 NE 50°,发现潜在变形体的后缘和侧缘的裂缝已经基本贯通,且裂缝正在持续变形阶段。



图 6 313 号塔位变形体后缘拉裂缝

变形体的组成物质为碎石土,其地层岩性和物质组成与 314 号塔位滑坡一致。根据目前变形体所在山体的地形特征和变形特征,初步估计变形体长约 100 m,平均宽 50 m,厚度约 6 ~ 10 m。推测整个变形体的规模约为 $(2 \sim 5) \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

3 监测手段及实施方法

3.1 监测因素

由于 314 号和 313 号塔变形体和滑坡体是牵引式滑坡,且主要危害对象是塔基,因此,方案设计中主要考虑降雨量、杆塔倾斜和地表裂缝的监测。原因如下:

1) 地表裂缝监测

地表裂缝监测可以了解滑坡所处的变形范围发

展阶段。滑坡最明显的特征为滑动,需要监测的是滑动及其特征(包括大小和速率)和滑动时地面动态与变形,因此,滑坡的地表变形观测历来受到重视。

2)降雨量
降雨作用下水可能从边缘以及缝隙等渗入坡体内,从而增加滑体自重,软化滑动带土体,降低滑动带土体的抗剪强度,影响坡体稳定性。目前在滑坡后缘边界附近分布有若干条拉张裂缝,雨水可直接沿裂缝进入滑体或至滑带,并对滑体产生动水压力和浮托力,对坡体稳定性能产生较大影响。

3)杆塔倾斜
杆塔倾斜角度是滑坡、下沉、塌陷等典型地质灾害的直接表现,也是监测地表缓慢变形的直观特征。由于监测滑坡属于蠕变型滑坡,所以倾斜角度监测是重要且必要的。

3.2 监测方案

如图 7 所示,整个检测系统分为前端采集模块、控制模块、供电模块和传输模块 4 个部分^[3]。

前端采集模块包含 3 类传感器,分别包含雨量计、表面裂缝计和杆塔倾斜仪,主要用来监测影响杆塔稳定的状态量。

控制模块包含光纤光栅解调电路、MCU 控制电路,主要用于提供光纤传感器的检测光源并对反射回来的光信号进行处理,从而得出被测量滑坡体位移、地下水位、表面裂缝、温度等的变化值。

供电模块包含蓄电池、太阳能电池板、电源管理模块,主要用于保证系统正常供电,确保系统在遭遇连续阴雨天时能够持续工作 20 天以上。

传输模块包含 GPRS 数据无线传输模块、后台数据接收模块,主要用于开展间断的、突发性的和频繁的、少量的数据传输,同时能够完成短时大数据量传输。

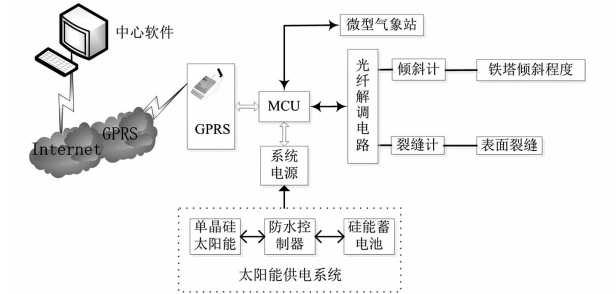


图 7 系统监测方案

在两基杆塔位置,各布置倾斜仪 1 台,直接测量杆塔变形;沿滑坡体中轴滑动方向,从上至下各布置

倾斜仪 2 台和 3 台,直接测量坡体的滑动情况。在滑坡体上方的裂缝处,各布置大量程的传感器 2 个,用于监测地表裂缝情况。在 313 号和 314 号杆塔之间空旷无遮挡处安置雨量计 1 台。在 313 号和 314 号杆塔高处,各布置数据采集仪 1 台,用于采集测斜计、裂缝计数据,并转发回后方的数据处理中心^[4-5]。



图 8 系统布点方案

表 1 塔位监测设备统计表

监测装置	监测位置	设备数量	型号规格、主要技术指标
测斜计	313、314 号塔	7	杆塔部分 2 个:量程 $\pm 10^{\circ}$,精度 0.01° 滑坡体部分 5 个:量程 $\pm 10^{\circ}$,精度 0.01°
数据采集仪	313、314 号塔较高的位置	2	支持 GPRS 无线通信收发模块,供电能够满足 30 d 无太阳保证
雨量计	313、314 号塔附近空旷无遮挡位置	1	测量范围为 $0 \sim 8 \text{ mm/min}$,分辨率为 0.2 mm
地表裂缝计	313 号塔下	2	量程 $250 \sim 300 \text{ mm}$,精度为 1 mm

4 监测数据分析

4.1 地表裂缝计数据分析

自仪器安装调试结束之日起至 2016 年 7 月,现场 313 号塔位变形体区域变形显著。6 月 15 日的强降雨导致裂缝计发生突变,当天的变化量高达 10 mm,随后变形体进入加速蠕变阶段,应变速度约为 4.37 mm/d,总变形量约为 61 mm。

4.2 雨量计数据分析

根据某 500 kV 输电线路 313 号和 314 号塔位雨量站的 2016 年 6 月监测数据显示表明:昭觉县

313 号和 314 号塔位滑坡区降雨量在 6 月 15 日达到最大值为 47.5 mm。6 月 19 日降雨量为 38 mm,如图 9 所示。

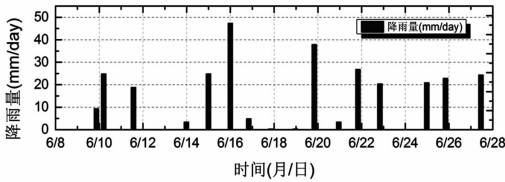


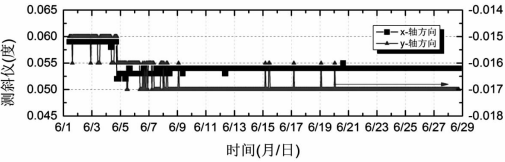
图 9 313 号和 314 号塔位滑坡区
降雨数据(2016 年 6 月)

图 9 的监测数据显示, 6 月的降雨强度不大,最强的一次降雨在 6 月 10 日凌晨 3 点,强度为 9.5 mm/h。6 月降雨量超过大雨等级的次数为 4 次,分别为 14 日、15 日、19 日和 21 日。

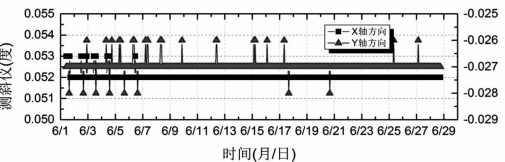
4.3 倾斜仪数据分析

测斜仪(4 个)分别布设于 313 号塔位塔顶、塔身、塔下挡墙及塔下坡体,用于监测塔位及滑坡体地表变形量,编号 01~04。

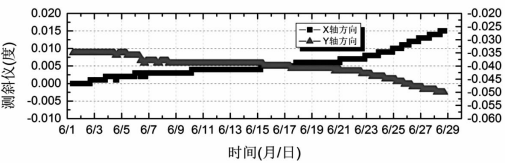
图 10 给出了 313 号塔位变形体测斜仪(01~04)监测数据,其中,测斜仪 01 和 02 数据基本保持



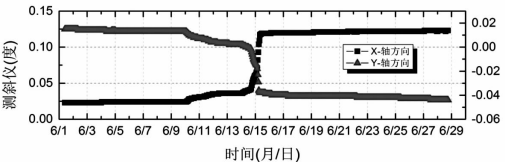
(a) 测斜仪 01 监测数据



(b) 测斜仪 02 监测数据



(c) 测斜仪 03 监测数据



(d) 测斜仪 04 监测数据

图 10 313 号塔身倾斜仪监测数据(01~04)

不变。由于测斜仪 01 和 02 分别布设于输电塔顶及塔身,因此,初步判定 313 号塔处于基本稳定状态。

测斜仪 03 监测数据显示:6 月 3 日开始监测点持续变形,至 28 日 x 轴累积变形量约为 0.04°,变形速率约为 0.001 5°/d(如图 10(c)所示)。由于变形速率缓慢,且从现场反馈信息判断,313 号塔基下部挡土墙未出现较大变形破坏,综合分析判断挡土墙基本处于稳定状态.但进入蠕变初级阶段(匀速变形阶段)。

测斜仪 04 监测数据显示:6 月 10 日至 14 日,313 号塔位变形体中下部斜坡进入稳定变形阶段,岩土体变形大致以等速发展,曲线近似一倾斜直线的应变速率发展,累计变形量约为 0.02°,变形速率大体不变约为 0.004°/d。6 月 15 日,监测数据有一突变,其中 00:00~08:00 x-轴累积变形量达到 0.06°,y-轴累积变形量到达 0.04°,变形速率约为 0.18°/d,斜坡进入加速蠕变阶段。

4.4 数据综合分析

综合分析 313 号塔位变形体雨量计、裂缝计和测斜仪的监测数据,只有 313 号塔左侧裂缝计和测斜仪 04 监测数据变化较大,因此仅分析这两台设备监测数据与降雨量之间的关系,如图 11 所示。

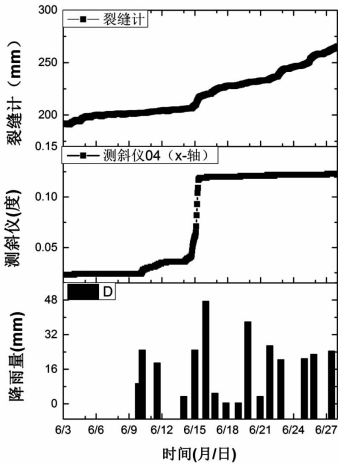


图 11 313 号塔位监测数据综合分析

图 11 显示 6 月 9 日至 11 日 3 天累计降雨量高达 53.5 mm,313 号塔位变形体中下部测斜仪 04 点监测区域进入蠕变初级阶段(匀速变形阶段)。6 月 14 日至 15 日的中转大雨,两日累计降雨量高达 72.5 mm,裂缝计数值发生突变,当天的变化量高达 10 mm,随后变形体进入加速蠕变阶段,应变速度约为 4.37 mm/d,总变形量约为 61 mm。测斜仪 04 监测

(下转第 55 页)

500 kV 变电站地表缓慢沉降监测技术研究及应用

韩晓言¹, 卜祥航²

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041;
2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

摘 要:为实现多模式地表缓慢沉降监测技术并提高监测预警的成功率,论述了基于 INSAR 遥感监测、光纤传感监测和地质雷达地表无损监测等监测技术的研究及应用。以四川省甘孜州某 500 kV 变电站地面沉降为例,结合实地野外调查,对空间监测数据进行效果分析,验证了此监测方法的可行性和准确性。

关键词:地面沉降;光纤传感;空间监测数据;地质雷达

Abstract:In order to realize the multi - mode monitoring technologies for transmission channel land subsidence and improve the success rate of monitoring and early warning, the space monitoring system is established, including INSAR remote sensing, optical fiber sensing and non - destructive surface monitoring with geological radar. Based on the ground subsidence of a 500 kV substation in Sichuan province, the feasibility and accuracy of the proposed monitoring system are verified by field investigation and the effect of monitoring system.

Key words:surface subsidence; fiber sensing; space monitoring data; geological radar

中图分类号:TM835 文献标志码:A 文章编号:1003 - 6954(2017)02 - 0046 - 05

0 引 言

四川地区作为中国重要的清洁能源送出基地,且地质活动频繁,大量的水电送出通道、特高压通道都不可避免地穿越脆弱的地质环境。因此地质灾害对输电通道和电网基础设施的威胁日益加剧,对电网应对地质灾害提出了极大的挑战^[1-3]。

基于地质灾害的突发性和复杂性,其监测预警研究目前仍是国际热点^[4-6]。国外采用遥感、GPS 卫星定位技术、气象雷达及微震技术等监测手段对滑坡和地形形变等地质灾害进行监测,以实现地质灾害的长期、中期和短期的预报^[7-8]。国内虽起步较晚,但是现代测量技术、信息技术、计算机技术,特别是 3S 技术集成及其他相关领域的高速发展为地质灾害监测预警系统提供了先进的技术支撑^[7-11],同样也运用到四川电网的防灾减灾预警工作中。文献[7]利用 3S 技术集成分析了丹巴康定输电走廊地质灾害遥感特征及预警对策;文献[12]利用光纤传感器和 GPRS 分析了四川某输电走廊滑坡的变形特征。然而前人的研究中监测数据种类单一,无法实现监测数据的相互验证,从而无法获得经济性与

准确性兼具的输电走廊地质灾害监测技术手段。

下面以某 500 kV 变电站地面沉降灾害作为案例分析,通过野外实地调查,结合 INSAR 遥感监测、光纤传感器传感监测和地质雷达的地表无损监测技术,实现对目标区域和点位全面立体的持续监测。根据多种监测数据综合判断、互相验证,提高地质灾害的预警成功率,对地表缓慢沉降监测进行有效的早期预警,从而对电网的安全可靠运行及社会经济的稳定发展提供巨大的保障。

1 地表缓慢沉降空间监测系统

1.1 INSAR 遥感监测技术

利用监测区域的高分辨率光学和 INSAR 遥感影像,实现 SAR 图像滑坡和地形形变信息提取:1)利用 SAR 图像和极化分解方法提取输电通道以及附近区域的植被覆盖变化信息^[13],给出植被分布图,以此为基础再利用多极化 SAR 图像提取大规模滑坡信息,见图 1;2)利用 SAR 图像和 D-INSAR 技术^[14],提取输电通道缓慢地形形变信息,给出地形形变速率,从而判断发生地质灾害的可能性以及对输电设施的危害性,见图 2。

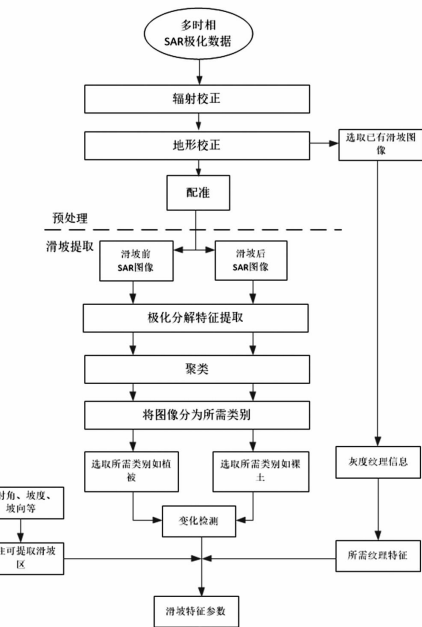


图 1 大规模快速滑坡信息提取流程

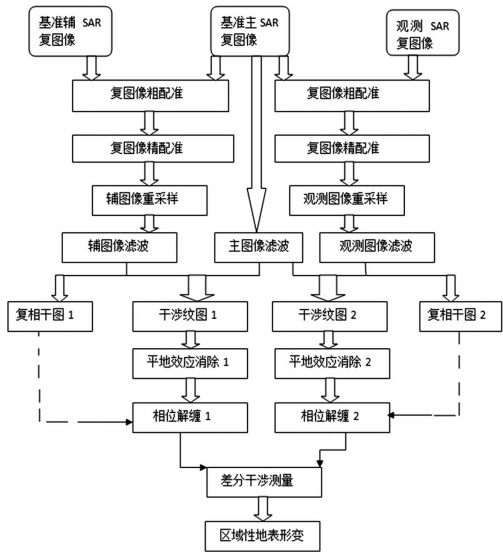


图 2 缓慢滑坡信息提取流程

1.2 地质雷达监测技术

地质雷达利用宽频带短脉冲电磁波,由天线发射器发送至地下,经目标体或电性界面反射后由雷达天线器接收,并以电磁反射波时域曲线形式成像。通过对所接收的雷达信号进行处理和图像解译,达到探测异常的目的,如图 3 所示。利用地质雷达完成电网不同类型地质灾害特征勘查与原因分析,突破了以往地质灾害单纯依靠地面测量为主的技术缺陷。

1.3 光纤传感器监测技术

靠近变压器等强电磁场的附近,光纤类的方案能够抵御强烈的电磁干扰。各个传感器之间用通信光缆连接起来构成光信息传输通道,最终传输给杆

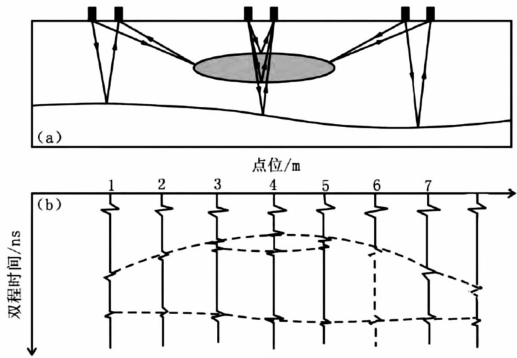


图 3 地质雷达探测原理示意图

塔上光纤调制解调仪器。后者从中获取信息后,通过电力部门专用的信号或者采用无线的方式,将数据传回控制中心,传感监测系统流程图见图 4。

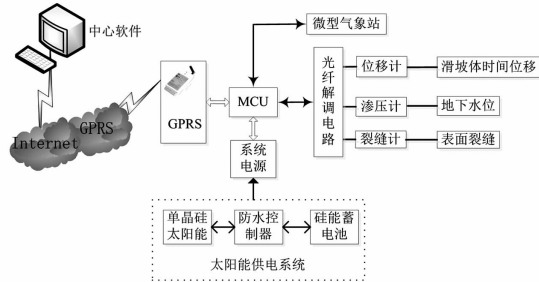


图 4 光纤传感器监测技术示意图

2 监测系统实例分析

某 500 kV 变电站地面高程约 1 900 m,后缘高程 2 100 m 左右,相对高差约 200 m,属侵蚀剥蚀中高山峡谷。变电站所在区域处亚热带高原季风气候区,具有高原型气候的特点,主要受高空西风 and 西南季风影响,干湿季节分明。变电站位于一古滑坡堆积体上,堆积体前缘较陡约 35°~45°,后缘为较为平缓约 15°~30°。堆积体下游侧基岩露头已形成陡崖地形。变电站位置见图 5。变电站承担着该地区多数中小型电站电力电量输出的任务,对于当地国民经济发展具有重要的意义。由于变电站位于一古滑坡堆积体上,虽然修建时在前缘进行了大面积填方,但从 2015 年 7 月开始变电站内部出现了多处沉降变形,导致地面裂缝、墙体开裂和杆塔倾斜。变电站光纤传感器布置图见图 6。

2.1 变电站地裂缝发育特征及趋势分析

通过对 500 kV 变电站实地调查,结合卫星影像图,发现共发育 6 处沉降裂缝,其变形位置分布在电站环形路面的正北、北东、北西方向,裂缝分布见图 7。

野外调查的裂缝详细信息如下:

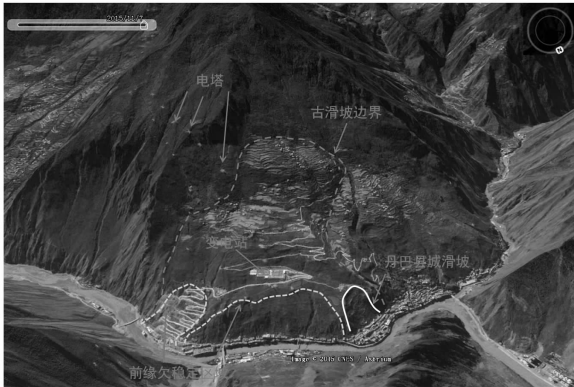


图5 变电站位置图



图6 变电站沉降观测布点图



图7 500 kV 变电站沉降裂缝点位置卫星影像图

1号裂缝,2014年7月至8月发现,2015年7月至8月扩大到1 cm,至今无明显形变,宽度为1 cm、长度为4.5 m的东西向开裂。仅出现拉张裂缝,无明显沉降变形,裂缝旱季变形量较小,但雨季随着降雨产生的地表水渗入,有进一步变形的可能性。

2号裂缝,2013年12月发现(已封填),成南北向展布,长度为2.5 m,宽度为0.5 cm,有分支,分支角度30°。封填后无新的沉降变形,经过长期监测后,如果仍无变形,可以确定为稳定状态。

3号裂缝,2015年7月发现(已封填),裂缝与垂直方向成30°角,宽度约为0.5 cm,长度为2 m贯穿。封填后无新的沉降变形,过长期监测后,如果仍

无变形,可以确定为稳定状态。

4号裂缝,2015年7月发现墙体微裂,裂缝呈45°,宽度约为0.3 cm,长度为3 m,基本贯通。沉降变形不明显,有进一步变形的可能性。

5-1号、5-2号、5-3号裂缝,2015年7月发现,至2015年8月汛期以来不断扩展,均沉降变形严重。5号裂缝是目前全变电站规模最大、分布范围最广、变形量最大、变形速度最快的裂缝。未来,已出现的宽口裂缝极易使地表水入渗,裂缝加剧发展变形的可能性很大,裂缝规模见表1。

6号裂缝,2015年12月发现,挤出裂缝位移最大处为5 cm,自上而下长为2.5 m。挤压变形严重,存在牵引破坏的可能。

表1 500 kV 变电站地基5号裂缝规模统计	
裂缝编号	裂缝规模
5-1号	沉降裂缝长度为4.5 m,沉降位移量平均为11 cm
5-2号	裂缝基本贯穿,长度为6.5 m,最大宽度为0.7 cm
5-3号	长度为6.5 m,裂缝最大宽度为6.5 cm,深度为30 cm,沉降量约为7 cm

通过野外调查分析可知,500 kV 变电站内沉降裂缝较为发育,在持续强降雨条件下,有可能会进一步发生沉降变形。

2.2 地质雷达监测效果分析

根据地质雷达探测解释成果(图8)可知:变电站由于是填方地基,下方地层结构较杂乱,无明显基岩界面,存在多外地下水富集区。推测变电站地面沉降的主因是填方导致的不均匀沉降,其中地下水的异常分布是最直接的诱因,如图9所示。

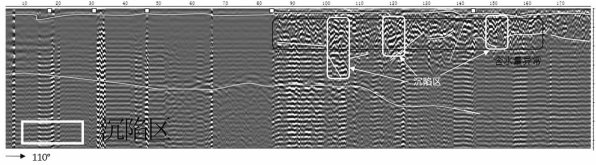


图8 地质雷达探测现象解释

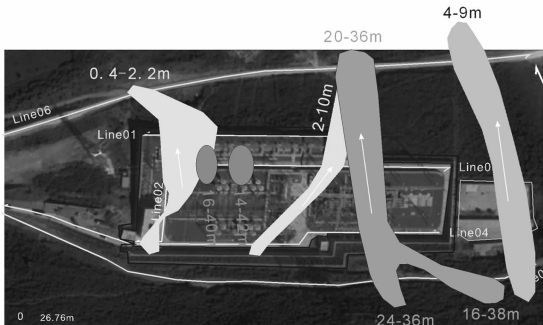


图9 变电站地下水分布示意图

2.3 基于极化分解技术的大规模滑坡提取效果分析

所选两幅 SAR 图像为 Radarsat - 2 全极化数据,分辨率为 $5.2\text{ m} \times 7.6\text{ m}$,获取时间分别为 2016 年 5 月 25 日和 2015 年 6 月 18 日。中心经纬度为 $101^{\circ}50'31''\text{E}$ 、 $30^{\circ}52'36''\text{N}$ 。其范围为左上角 $101^{\circ}40'21''\text{E}$ 、 $31^{\circ}1'51''\text{N}$;右上角 $102^{\circ}0'40''\text{E}$ 、 $31^{\circ}1'51''\text{N}$;左下角 $101^{\circ}40'21''\text{E}$ 、 $30^{\circ}43'23''\text{N}$;右下角 $102^{\circ}0'40''\text{E}$ 、 $30^{\circ}43'23''\text{N}$ 。

本算法中图像经过了 7×7 多视处理以及地形校正,根据初始像素点分辨率,因此一个像素点大约为 $49\text{ m} \times 49\text{ m}$ 。为了便于显示,选择 VV 极化强度值作为背景灰度图。另外,由于变电站标记于图上为一个像素点,肉眼不宜区分,因此将变电站及其周围 3×3 像素点标记为圆形白点(图中方框内),白点中心像素代表变电站所处位置;其余白色区域为实际提取结果,是 5 月份至 6 月份在变电站附近可能发生的滑坡分布。根据图 10 可以看出,变电站远离滑坡区域,2016 年 5 月 25 日至 2015 年 6 月 18 日期间发生的滑坡对变电站不会构成危害。

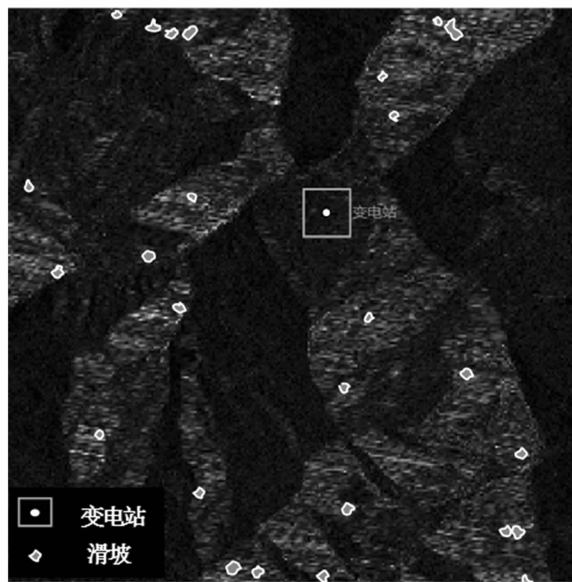


图 10 监测区域提取结果图

2.4 变电站区域缓慢形变信息提取效果分析

基于 DINSAR 技术利用多幅全极化数据对变电站附近区域地表形变信息进行了初步提取,采用的图像与大规模滑坡信息提取的图像相同。

变电站区域: -2 cm (符号为正,代表地表上升,反之则下降)。

根据缓慢形变提取结果可知,该区域都有不同程度的地形形变,但是形变量较小,铁塔和变电站都

比较安全,如果有强降水,则会导致形变速度加快,需要关注。

综上所述,500 kV 变电站地表缓慢沉降监测技术,确定了地面沉降的主要诱发因素是丰富的地下水,并提取了变电站区域地形形变参数和周边滑坡信息,建议在强降雨条件下,加强对变电站的监测预警工作。

3 结 论

地表缓慢沉降监测技术包括野外实地调查、IN-SAR 遥感监测技术、光纤传感器传感监测和地质雷达地表无损监测技术。主要解决的问题在于可根据多种监测数据综合判断、互相验证,而获得经济性与准确性兼具的监测系统。

以某 500 kV 变电站地面沉降为例,通过地质雷达监测技术,发现地面沉降的主要诱发因素是异常丰富的地下水。在强降雨条件下,地面沉降会有继续变形的可能性,这在野外调查和利用 SAR 影像提取的地形形变参数得到了验证。而周边地质环境对变电站的影响,通过基于极化分解技术的大规模滑坡信息提取,可知 2016 年 5 月 25 日至 2015 年 6 月 18 日期间发生的滑坡对变电站不会构成危害。上述案例分析,充分证明了地表缓慢沉降监测技术的可用性与可靠性。

参考文献

- [1] 严福章,李晓军. 电网工程滑坡滑带的工程地质性质[J]. 电力建设, 2010, 31(11): 43 - 46.
- [2] 张星海,贾志杰. 四川电网建设运维面临的挑战和解决措施[J]. 高压技术, 2016, 42(4): 1091 - 1099.
- [3] 王圣伟,邓创,刘友波,等. 四川电网环境地质灾害隐患统计分析与对策[J]. 能源与环境, 2015(6): 43 - 46.
- [4] 黄露,谢忠,罗显刚. 地质灾害监测预警信息共享机制研究[J]. 测绘科学, 2016, 41(5): 55 - 59.
- [5] 冯振,李滨,赵超英,等. 三峡库区山区城镇重大地质灾害监测预警示范研究[J]. 地质力学学报, 2016(3): 685 - 694.
- [6] 徐政宏. 在线监测技术在地质灾害监测中的应用[J]. 地理空间信息, 2016, 14(7): 93 - 95.
- [7] 曹永兴,常鸣,唐川,等. 丹巴康定输电走廊滑坡泥石流遥感调查及预警对策[J]. 地质灾害与环境保护, 2013, 24(2): 8 - 15.

[8] Cao Y X, Chang M, Tang C, et al. Remote Sensing Interpretation and Early Warning System Designing of Geohazards along Transmission Lines – A Case Study of the Danba – Kangding 500 kV Double Circuit Transmission Line[J]. Advanced Materials Research, 2014, 986 – 987:1647 – 1650.

[9] 何满潮. 滑坡地质灾害远程监测预报系统及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6):1081 – 1090.

[10] 刘传正. 中国地质灾害监测预警站网建设构想[J]. 地质通报, 2002, 21(12):869 – 875.

[11] 王福涛, 王世新, 周艺, 等. 高分辨率多光谱的芦山地震次生地质灾害遥感监测与评估[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(1):181 – 185.

[12] Cao Y X, Xue Z H, Zhang C H, et al. Design and Application of Online Landslide Monitoring System for Transmission Lines Corridor Based on the Optical Fiber Sensing Technology [J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 556 – 562:3160 – 3163.

[13] 牛朝阳, 马德宝, 张向峰. SAR 目标极化分解方法研究[J]. 微计算机信息, 2005(23):98 – 100.

[14] 于晶涛, 陈鹰. D – InSAR 监测地面沉降研究[C]. 城市建设与生态环境监测遥感技术应用交流会, 2002.

作者简介:

韩晓言(1965), 博士、高级工程师, 研究方向为电力系统运行和控制、智能电网技术。

卜祥航(1987), 博士, 主要从事输电线路地震地质灾害与抗震减灾技术研究。

(收稿日期:2017 – 03 – 03)

=====

(上接第 30 页)

从图 8 和图 9 可以明显看出桃乡变电站 500 kV 母线发生三相接地短路故障对联络线功率的影响明显要大于其他地点故障;另外,通过观察故障时川电外送的三大特高压直流输送的功率也可以发现,当桃乡变电站发生故障时,该功率波动值也较其他地点故障时更大,因主要研究交流联络线功率波动情况,故未列出该仿真结果。因此,四川电网运行过程中桃乡变电站 500 kV 母线及其附近输电线路应作为重点关注的对象。

4 结 语

基于四川电网及华北、华中电网 PSASP 详细仿真模型,研究了四川电网不同地点切机及三相接地短路两种扰动类型对川渝断面及华北、华中电网特高压联络线有功功率波动的影响,得出以下结论:

- 1) 四川电网切机扰动所导致的联络线功率波动最大变化量与切机量基本满足线性关系,且不同地点相同的切机量对联络线功率产生的影响差别不是很大,基于该线性关系可对联络线功率波动最大值进行估算。
- 2) 四川电网不同地点的母线三相接地短路故障对联络线功率产生的影响差别较大,严重时甚至导致功率反送现象。其中,桃乡变电站 500 kV 母线处故障造成的影响尤其严重,应对该母线密切关注。

参考文献

[1] 洪峰,陈金富,段献忠,等. 弱互联大区电网联络线功率振荡研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10):

[2] 陈磊,刘辉,闵勇,等. 两区域互联系统联络线功率波动理论分析[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 53 – 58.

[3] 赵红生,刘源,陈伟彪,等. 互联电力系统联络线功率波动机理及其扰动概率分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 1 – 9.

[4] 刘巨,孙海顺,刘子全,等. 华中 – 华北交流同步电网简化等值建模分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(6):38 – 42.

[5] 汤蕾,沈沉,王志文,等. 基于端口供给能量的特高压电网扰动冲击传播机理分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 824 – 831.

[6] 刘巨,孙海顺,文劲宇,等. 交流互联电网中大扰动对联络线的冲击特性分析方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21):17 – 21.

[7] 云雷,刘涤尘,廖清芬,等. 基于功率分布法分析和控制区间联络线功率振荡[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10):7 – 13.

[8] 屠竞哲,杨莉,黄涌,等. 直流闭锁引发交流联络线功率波动的机理以及峰值计算[J]. 电力系统自动化设备, 2013, 33(1):12 – 17.

[9] 何剑,张健,郭强等. 直流换相失败冲击下的两区域交流联络线功率波动峰值计算[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4):804 – 810.

[10] 王康,兰洲,甘德强,等. 基于超导储能装置的联络线功率控制[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(8):5 – 9.

[11] 孙建波,赵炯,李大虎,等. 利用储能抑制互联电力系统联络线功率振荡的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17):10 – 17.

作者简介:

张 鹏(1985),博士,主要研究方向为电力系统稳定性分析与监测,交直流电网相互影响研究;

孙永超(1991),硕士,主要研究方向为直流输电及配网研究。

(收稿日期:2016 – 11 – 30)

针对风电汇集地区无功电压的研究

李朝阳¹, 常喜强², 张 锋², 王 衡², 郭小龙², 刘德福², 徐 志³

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 新疆电力调度控制中心, 新疆 乌鲁木齐 830006;
3. 国网新疆电力公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘 要:针对目前送端电压无功补偿能力不足、风电汇集地区内的风电场和机组无功补偿不同步以及风电机组和汇集站的控制方式不统一的现象,提出了一种无功控制策略——风电场群无功优化控制(wind farms cluster optimal reactive power control)。该控制方案依据当前的运行工况和先前的断面信息建立了多目标化的控制函数并进行了计算分析,从而实现了静态设备的调节和连续的动态补偿。通过仿真验证表明了无功优化控制在电压稳定性问题上的策略是可行的。

关键词:无功补偿;优化控制;控制函数;电压稳定性

Abstract:At present, the reactive compensation ability of sending - end voltage is insufficient, the reactive compensation of wind farm and wind turbines in wind farm integration area is not synchronized, and the control mode for wind turbines and wind farm collecting stations is not uniform. In view of the above - mentioned situation, a reactive voltage control strategy is put forward, that is, wind farms cluster optimal reactive power control strategy. The control scheme establishes the multi - objective control functions and carries out the calculation and analysis based on the current operating mode and the previous section information, therefore the adjustment of static equipment and continuous dynamic compensation are achieved. The simulation test shows the feasibility of optimal reactive compensation on voltage stability.

Key words:reactive compensation; optimal control; control functions; voltage stability

中图分类号:TM614 文献标志码:A 文章编号:1003 - 6954(2017)02 - 0051 - 05

0 引 言

最近几年可再生能源得到了飞速的发展,以风电为首的新能源具有重要的商业价值,也是当前发展相对成熟的产业。在过去的十年里,风电的全球装机容量增加了 8 倍,中国的风电装机增加了 158 倍,风电大量接入电网导致地区电网电压不稳定现象频繁发生^[1-3]。针对当前的状况可以看出,除了一些风电机组不具有穿越能力外,还有风电汇集站的站内机组和电容电抗器等无功补偿元器件的控制方式不统一;各个风电场汇集站的自动电压控制方案是相互独立的,自动电压控制的动态性及各个无功补偿设备的响应时间不同步,达不到规定的要求^[4-6]。随着风电的大规模开发,新疆哈密地区风电集群并网所凸显出来的电压稳定问题日益突出,单个风电场及单个汇集站的无功补偿已不能满足地

基金项目:国家自然科学基金项目(51267017)

区电压稳定的发展要求,急需深入研究风电汇集地区多种自动电压控制系统的优化策略,用来提高各级调度对风电汇集地区系统电压的稳定^[7-10]。

为了有效应对电压稳定问题,提出了风电场群无功优化控制策略,此策略研究交直流电网动态无功优化调度控制,分析新能源和负荷的变化趋势,并综合协调 SVC、发电机的电抗器及变压器分接头等无功电压设备,在完整调度周期内进行多时段耦合,以实现无功电压的精细调控^[11-14]。

1 无功电压控制策略

1.1 无功设备的特性分析

风电汇集地区内的无功调节设备主要包括 SVC、SVG、有载调压变压器、风电机组、并联电容电抗器。这些无功调节设备由于在时间和空间上具有不同的物理分布特性,所以控制的策略也存在差异。大型风电场内主要无功设备的运行特性如表 1 所示。

表 1 主要无功设备的运行特性比较

设备分类	设备单元	补偿特点	补偿位置	响应时间
静态设备	变压器分接头、电容器组	离散阶梯型调节 投切产生尖峰脉冲	集中补偿	秒极,慢
动态设备	SVC/SVG	连续平滑动态调节	集中补偿	毫秒级,快
风电机组	双馈风电机组	连续平滑调节	集中补偿	秒内,较快
	直驱风电机组	单击补偿量有限		

上述比较分析可得:新能源在电网中达到稳定安全的运行,需要综合分析多种无功在时间和空间上的物理特性并进行综合利用,这是实现风电汇集地区无功优化策略的突破点。

1.2 无功特性原则

从表 1 可以看出,并联电容电抗器和有载变压器等离散的无功调节设备能够提升风电接入电网的电网稳定极限,控制风电汇集站内电压在规定范围内波动,但是其响应时间比较慢,只能实现突变、分步分阶控制,不能进行精细化调整。

同时可以看到 SVC 设备运行简单,能够在容、感两性上面自由平滑连续地进行切换,从而迅速平移风电场有功变化带来的无功电压波动。与 SVC 相比较,SVG 除了具有 SVC 的特性之外,还省去了发热量大的电容电感等元器件,从而减少了无功损耗;然而由于 SVC/SVG 的造价较高,会增加风电场的投资成本。当电网发生短路故障引起部分风电机组脱网以后,由于 SVC 设备控制方式的不合理继续在电网中运行,会导致局部电网无功过高,事故进一步扩大。

变速风电机组是优质的无功调节电源,可以在正常运行期间快速调节无功输出,从而稳定风电场内电压并向电网提供无功支撑。当电网发生故障后可以通过控制变流器来维持机端母线电压恒定,能够很好地抑制大扰动故障动作后的无功过剩问题。但是当缺失大量无功的情况下,变速风电机组的无功补偿特性就大大减弱了。

2 无功电压优化方案

随着风电场数据采集与监控管理系统的发展和完善,风电场数据监控平台能够实时获取风电场内的拓扑结构以及控制单元的运行信息,并对底层设备下发指令进行远程控制。基于此,所提出的风电

场无功优化控制是以风电场实时检测系统为前提,充分考虑多种无功补偿设备在时间和空间上的协调控制,通过上下级调度控制中心下发的控制信号,并建立多目标模型使系统的无功电压达到最优的分配。如图 1 所示。

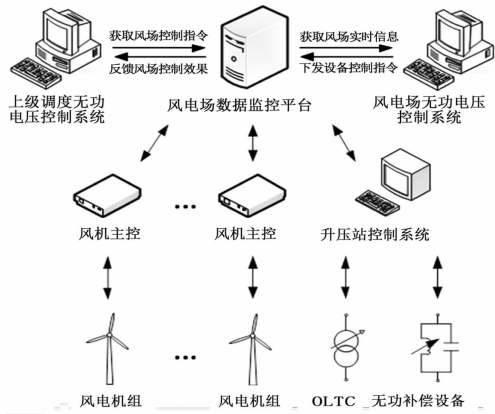
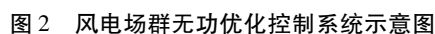


图 1 风电汇集地区无功优化示意图

无功调节系统首先根据风机实时的有功出力 P_g 计算出当前各风机的无功出力极限 Q_{gmax} 和 Q_{gmin} , 然后根据预设的控制目标和上级调度下达的控制指令 U_{PCC}^{ref} 制定相应的控制策略,并将控制参考值下发至风电场内的各个电压无功调节单元。各控制单元根据自己的运行特性响应无功调节系统下发的控制参考值,再将本次控制执行后的 PCC 电压实际值 U_{PCC} 反馈给上级调度系统。

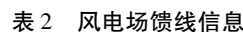
风电汇集地区的调压措施主要依靠汇集站调压风电场的无功补偿设备来完成,目前风电汇集地区 AVC 研究主要包括集中和分级两种控制模式。集中式控制结构设置的控制中心依据不同的控制目标制定相应的优化控制策略,然后下发无功指令或电压指令至各个风电场和汇集站内的电容器组、有载调压变压器、SVC 和变速风电集群等设备;分级式控制结构是基于传统的三级电压控制体系设置风电场无功电压控制区域站,向上接收大电网无功优化调度给定的设定值;向下再通过分层分区给各个风电场和汇集站电压控制子站下发无功电压控制指令,

所提的风电场群无功优化控制是依据分层分压的原则进行 AVC 控制,其结构如图 2 所示。



为了避免无功补偿反应时间慢的缺点,汇集站和风电场的变压器分接头及电容电抗器在响应时间周期内收到的指令不发生改变;风电场子站调节升压站内的动态补偿设备(如 SVC)和风电场内的变速恒频风电机组,闭环响应集群区域站下发的并网电压控制指令,用来保证风电汇集地区并网点电压控制在允许的电压范围内。

以哈密地区某风电汇集地区为例进行仿真验证,系统图如图 3 所示。该风电场装机容量为 121.5 MW,场内分散分布的 81 台 1.5 MW 双馈风电机组分别通过 8 条馈线(地下电缆)连接至风电场升压站内主变压器的低压侧母线,馈线信息详见表 2 所示。风电场内两套 SVC 无功补偿设备的容量均为 $-40 \sim 60$ Mvar。



馈线	长度/km	风机容量/MW	风机编号
A	9.269	9×1.5	1 ~ 9
B	6.940	10×1.5	10 ~ 19
C	4.069	7×1.5	20 ~ 26
D	6.259	9×1.5	27 ~ 35
E	11.375	13×1.5	36 ~ 48
F	11.960	12×1.5	49 ~ 60
G	18.140	9×1.5	61 ~ 69
H	18.580	12×1.5	70 ~ 81

方式 1 和方式 2 的无功输出曲线可以看出,在机组能够调节无功的情况下,场内分散的 DFIG 风电机组能够达到与集中无功补偿设备相同的调压目

表 3 4 种不同风机出力下的 3 种调压优化的数据对比

运行工况风电出力	方式 1		方式 2		方式 3		
	Q_{SVC}/Mvar	$U_{Gmax}/(\text{p. u.})$	Q_{DFIG}/Mvar	$U_{Gmax}/(\text{p. u.})$	Q_{SVC}/Mvar	Q_{DFIG}/Mvar	$U_{Gmax}/(\text{p. u.})$
10%	14.102	1.019 8	14.614 1	1.029 9	3.367 2	11.104 9	1.024 5
30%	23.380	1.027 3	24.406 4	1.044 5	6.118 1	17.964 3	1.033 4
50%	38.521	1.036 1	40.703 1	1.064 3	7.430 3	32.729 5	1.048 7
70%	59.109	1.045 9	63.510 9	1.089 0	11.992 2	50.307 7	1.067 2

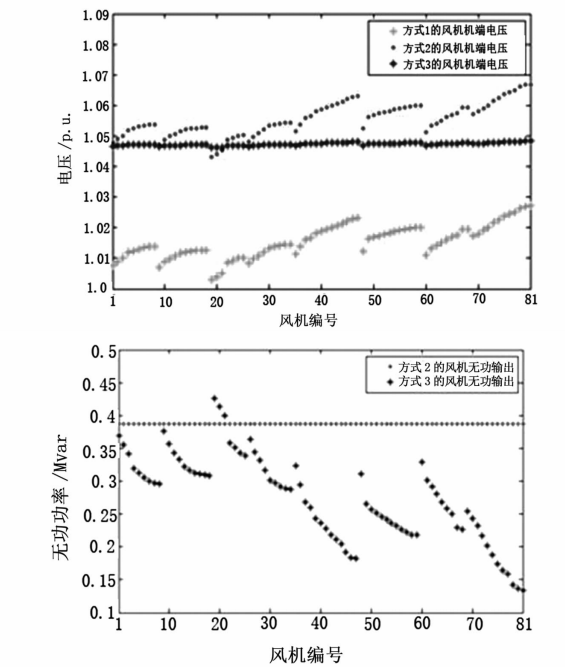


图 4 50% 出力状况下不同调压方式的 DFIG 风电机组端电压和无功输出示意图

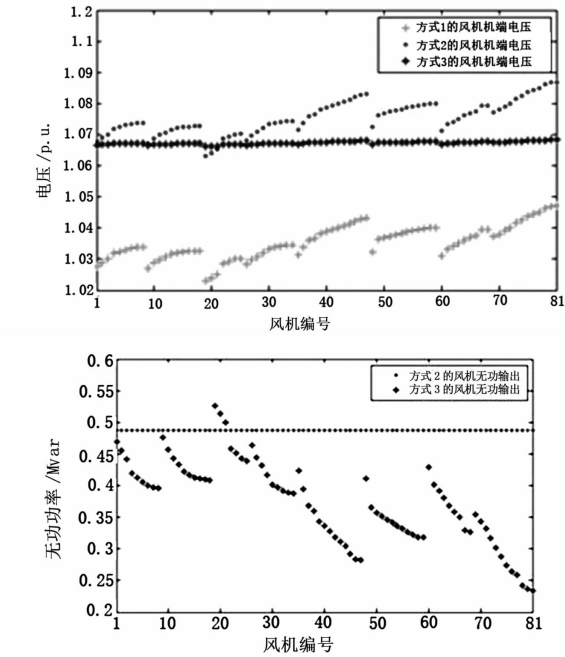


图 5 70% 出力状况下不同调压方式的 DFIG 风电机组端电压和无功输出示意图

的,并且 DFIG 风电机组的无功输出稍微高于 SVC

的无功输出。这是因为风电机组和风电场内的 SVC 补偿设备距离风电场并网点的远近程度不同,风电机组输出的无功经过远距离的输送并经过多台升压变压器送出产生了损耗。方式 3 通过风电场群无功优化控制协调控制 DFIG 风电机组与 SVC 的无功出力,让 DFIG 风电机组首先进行无功补偿,从而使 SVC 和 DFIG 的无功出力小于方式 1 和方式 2,这样的话 SVC 的无功裕度就比较大,而且风电场内的无功损耗相对来说就比较小。综上分析可以得到,所提的控制策略能够使系统的无功优化达到一个比较好的程度,从而为接入风电的电网系统的稳定性和安全性奠定基础。

4 结 论

针对目前风电汇集地区没有建成多个无功补偿系统,提出了风电场群无功优化控制策略,对电网尤其是新能源接入地区的电压薄弱区域辨识,通过无功优化有针对性地提高电压薄弱区域的稳定,从而提高电网对新能源接入的适应性。以风电机组的补偿作为基础,同时以风电机组的动态无功补偿作为主要的调节手段,采用多种补偿设备共同补偿,从而达到一个最优的控制,通过协调控制使风电场汇集地区的电压达到一个安全稳定的效果,对以后的大规模风电汇集地区的无功电压补偿有重要的借鉴作用。

参考文献

[1] 熊传平,张晓华,孟远景,等. 考虑大规模风电接入的系统静态电压稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012,30(21):132-137.

[2] 王松,李庚银,周明. 双馈风力发电机组无功调节机理及无功控制策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2714-2720.

[3] 栗然,唐凡,刘培英,等. 双馈风电场新型无功补偿与电压控制方案[J]. 中国电机工程学报,2012,32(19):16-23.

[4] 刘其辉,王志明. 双馈式变速恒频风力发电机的无功

功率机制及特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(3):82-89.

[5] 陈慧粉, 乔颖, 闵勇, 等. 风电场动静态无功补偿协调控制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(1):248-254.

[6] 秦涛, 吕跃刚, 徐大平. 采用双馈机组的风电场无功功率控制技术[J]. 电网技术, 2009, 33(2):105-110.

[7] 陈惠粉, 乔颖, 鲁宗相, 等. 风电场群的无功电压协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18):78-83.

[8] 邓卫, 唐西胜, 裴玮, 等. 含风电微型电网电压稳定性分析及控制技术[J]. 电工技术学报, 2012(1):56-62.

[9] 赵利刚, 房大中, 孔祥玉, 等. 综合利用 SVC 和风力发电机的风电场无功控制策略[J]. 继电器, 2012, 40(2):45-50.

[10] 姜宁, 赵剑锋, 王春宁, 等. 电压无功控制及其优化技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2011.

[11] 陈宁, 何维国, 钱敏慧, 等. 风电场无功电压控制系统设

(上接第45页)

数据有一突变,其中00:00~08:00,x-轴累积变形量达到 0.06° ,y-轴累积变形量到达 0.04° ,变形速率约为 $0.18^{\circ}/d$,斜坡进入加速蠕变阶段。这与现场调查反馈资料完全一致,见图12。

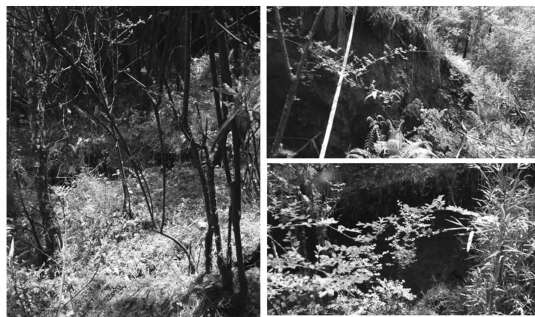


图12 313号塔基在建挡墙右下侧新增裂缝

5 结语

在大量现场查勘和试验的基础上,研究了一种基于光纤传感器技术的滑坡在线监测平台,解决了现有技术中监测系统存在的监测装置实时性和有效性较低、成本高、效率和准确率低以及可靠性较低的技术问题。该监测系统能够高效准确地实时地进行监测,具有良好的可靠性和较高的性价比。

对传统监测平台进行了改进,将光纤传感器、光调制解调仪、太阳能及蓄电池供能单元和无线通信装置等集成在一起,最大化地减小了工程量,提高了系统工作的可靠性;同时由于无需利用现有的电力系统通信网络,便于成果大规模地推广应用。

计和应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23):32-36.

[12] 王伟, 徐殿国, 王琦, 等. 大规模并网风电场的无功电压紧急控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(22):8-14.

作者简介:

李朝阳(1986),硕士研究生,研究方向为电力系统分析与控制;

常喜强(1976),高级工程师,研究方向为电力系统分析与控制、调度自动化;

张 锋(1978),高级工程师,研究方向为电力系统分析与控制、调度自动化;

王 衡(1984),高级工程师,研究方向为调度自动化;

郭小龙(1983),高级工程师,研究方向为调度自动化;

刘德福(1976),高级工程师,研究方向为调度自动化;

徐 志(1988),研究生,研究方向为电力系统分析与控制。

(收稿日期:2016-11-29)

研究成果在某500 kV输电线路313号和314号塔进行了现场应用,对获取的降雨量、表面裂缝和倾斜量进行了特征分析及关联分析,对滑坡体所处的状态进行综合诊断,并开展了比较验证工作,实现了对铁塔安全状态有效而全面的评估。

参考文献

[1] 丁勇, 施斌, 崔何亮, 等. 光纤传感网络在边坡稳定监测中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27:338-342.

[2] 黄民双, 陈伟民, 黄尚廉. 基于 Brillouin 散射的分布式光纤拉伸应变传感器的理论分析[J]. 光电工程, 1995, 22(4):11-36.

[3] 李爱国, 岳中琦, 谭国焕, 等. 香港某边坡综合自动监测系统的设计和安装[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5):790-796.

[4] Cao Yongxing, Xue Zhihang, Zhang Changhua, et al. Design and Application of Online Landslide Monitoring System for Transmission Lines Corridor Based on the Optical Fiber Sensing Technology [J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 556-562:3160-3163.

[5] Cao Yongxing, Chang Ming, Tang Chuan, et al. Remote Sensing Interpretation and Early Warning System Designing of Geohazards along Transmission Lines——A Case Study of the Danba - kangding 500 kV Double Circuit Transmission Line [J]. Advanced Materials Research, 2014, 986-987:1647-1650.

作者简介:

刘 勇(1968),高级工程师,国网四川省电力公司副总经理;

薛志航(1987),工程师,主要从事电力系统带电检测及故障诊断技术。

(收稿日期:2017-03-03)

基于潮流转移的输电断面快速搜索

杨文武¹, 王 彪², 王嘉庚¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049;
2. 国网四川省电力公司调度控制中心, 四川 成都 610047)

摘 要:针对前人研究中的不足,即没有提出分区内部输电断面以及非割集形式的基于热稳定约束的输电断面的搜索方法,将整个省网在地理分区的基础上对交界厂站进行优化,分别对分区间和分区内部进行研究,仅考虑线路和主变压器的热稳定约束,运用图论的相关知识,根据潮流转移的特征,进行输电断面的搜索。算例表明了所提算法的有效性。

关键词:分区优化;热稳定极限;潮流转移;脆弱线路;输电断面

Abstract:Aiming at the deficiency of previous studies, that is, the search method for transmission section in the zone and transmission section of non – cut set form, so the border stations are optimized on the basis of geographical divisions. The thermal stability constraints of lines and main transformer are only considered and the graph theory is used to search transmission section according the features of power flow transfer. Examples show the effectiveness of the proposed method.

Key words:partition optimization; thermal stable limit; power flow transfer; fragile lines; transmission section

中图分类号:TM732 文献标志码:A 文章编号:1003 – 6954(2017)02 – 0056 – 06

0 引 言

电力系统越来越复杂,在运行过程中,为了保证电网的安全稳定运行,需要有一系列的运行规则,而这个运行规则一般是在输电断面的基础上制定的。在电网实际运行中,传统的输电断面搜索是根据电网运行人员的经验或者经过全网计算分析所得,但由于人工计算的极限以及越来越多的新能源注入电网,传统的人工发现电网输电断面的方法已经无法满足大规模电力系统的需要,因此,越来越多的学者关注到输电断面的自动搜索。

目前,有关输电断面的自动搜索方法主要有:1)通过电网的网络拓扑和电气联系的紧密程度,将大规模复杂的网络划分为多个联系薄弱的子区间^[1-7],而输电断面就是这些子区间之间的联络线间的组合。该方法虽然能够是复杂的网络得到极大的简化,但是无法对分区内的线路进行搜索,即会漏掉分区内部的输电断面。2)基于大电网安全角度,根据过载支路两端节点之间的最短路径^[8-12]来找到受过载支路影响严重的线路组成输电断面。该方法搜索得到的线路是一些串联的线路,只适用于

大电网安全的紧急控制,无法用于输电断面输电能力的计算以及状态的监控。3)根据过载线路的电气特征,找到与过载线路功率组成相似^[13]的线路作为输电断面。该方法基于交流潮流,计算量大。

针对前人研究中的不足,即没有提出分区内部输电断面的搜索方法以及非割集的基于热稳定约束的输电断面的搜索方法,下面将整个省网在地理分区的基础上对交界厂站进行优化,分别对分区之间和分区内部进行研究,仅考虑线路和主变压器的热稳定约束,运用图论^[14]的相关知识,根据潮流转移的特征,进行输电断面的搜索。

1 电力系统分区

1.1 电网参数预处理

由于实际电网规模庞大,难以有效分析,需要根据其特征进行简化。可以将厂站中所有母线合并为一条母线,因此所研究的对象就是发电厂、变电站和线路,具体原则为:

- 1)只考虑高压输电网(220 kV 及以上),不考虑配电网和发电厂、变电站的主接线;
- 2)合并并联的输电线路(消除多重线路)。

1.2 交界节点分区优化

交界节点是指以地理分区为基础,连接2个及多个区域的低电压等级(220 kV)节点。分区间一般以高电压等级(500 kV)节点相连,为了保证分区间联络线的功率方向保持一致,对边界节点之间相关联的线路进行修正。当线路的潮流方向与该区域高电压等级(500 kV)联络线的潮流方向相反,若该线路的有功潮流与高电压等级联络线的有功潮流绝对值之比小于门槛值 k ,则认为潮流方向相同(例如内江市的董家湾节点和自贡市的向义节点之间的线路);若该线路的有功潮流与高电压等级联络线的有功潮流绝对值之比大于门槛值 k ,则需要对交界节点 i 和 j 进行调整,调整方法如下:

1) 比较交界节点 i 和 j 的度,将较小度的节点归入较大度的节点所在的区域。

2) 检验调整后的联络线的潮流方向是否一致,若不一致,转到步骤1);若一致,则结束调整。

1.3 电力网络的图论模型

简化后的电力系统中包括发电厂、变电站和输电线路。如果只考虑电力网络的拓扑结构,可以将电力网络用图 $G=(V,E)$ 来表示,其中: $V=(v_1, v_2 \cdots v_n)$,是指图的顶点集合,表示实际电力系统中的发电厂和变电站; $E=(e_1, e_2 \cdots e_k)$,是指图的边集合,表示实际电力系统中的输电线路。

在输电系统中,线路的电阻相对于电抗来说可以忽略不计,因此用线路电抗 x 来表示线路权值 w ,其加权邻接矩阵表示如下:

$$a_{ij} = \begin{cases} w_{ij}, i \neq j, <v_i, v_j> \in E \\ 0, i = j \\ \infty, i \neq j, <v_i, v_j> \notin E \end{cases} \quad (1)$$

式中: w_{ij} 为边的权值,这里以线路电抗值来表示;0为对角元素值; ∞ 表示两个顶点 v_i, v_j 之间没有直接相连的线路。

2 输电断面的搜索

输电断面的特征如下:

- 1) 输电断面中的线路之间的联系紧密,相互之间的支路开断分布因子比较大;
- 2) 输电断面中有1条线路开断时,其他线路的安全裕度比较小;
- 3) 输电断面中的线路有功功率的方向相同。

2.1 区域间输电断面的搜索

对于实际运行的电网来说,由区域间联络线所构成的输电断面应该是系统的割集。根据输电断面的定义,只要分区得当,即可以满足输电断面的第3个特征。输电断面的搜索其实就是简化后电网割集的求取过程,只涉及电网的拓扑关系,因此可以通过简单的矩阵运算得到。图1是经过简化后某系统的分区图,下面通过图1来说明区域间输电断面的搜索过程。

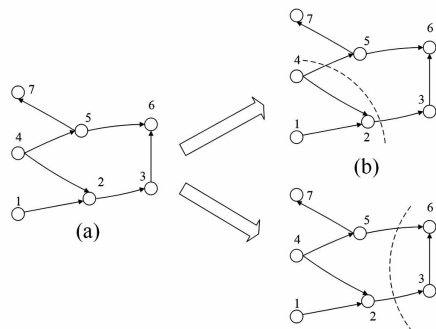


图1 输电断面搜索示意图

步骤1:将简化后系统分区图中的联络线全部存放在集合 L 中, $L = \{L_{1-2}, L_{2-3}, L_{3-6}, L_{4-2}, L_{4-5}, L_{5-6}, L_{5-7}\}$ 。

步骤2:将集合 L 中的线路按顺序逐条进行开断,判断系统是否连通。若不连通,则将该线路作为输电断面,且将该线路从集合 L 中删除;若连通,则转向步骤3。

步骤3:通过简单的矩阵运算求取与开断线路相关的输电断面,然后将该开断线路从集合 L 中删除。判断集合 L 中是否有线路,若有,转向步骤2;若没有,结束,区间输电断面搜索完成。

步骤3中的区域间输电断面的搜寻分为送电断面和受电断面两部分来完成,下面以 L_{2-3} 为例,来说明求取输电断面的具体方法。

步骤①:求取系统分区图的邻接矩阵 A 。

步骤②:由邻接矩阵 A 求取系统分区图路径矩阵 P 。其算法是,假设矩阵为 n 阶,求出 $B_n = A + A^2 + \cdots + A^n$,然后把矩阵 B_n 中不为0的元素改为1,而为0的元素不变,这样改变后的矩阵就是路径矩阵 P 。

步骤③:由路径矩阵 P 加上 n 阶单位矩阵得到矩阵 Q 。

步骤④:令 $Q_2 = Q(:, 2)$,即 Q 的第2列;令 $Q'_2 = (Q_2^{-1})^T$,即将 Q_2 中元素为0的换为1,将 Q_2 中

元素为 1 的换为 0,且将 Q_2 转置,变为行向量。

步骤⑤:令 $Q_3 = Q(3, :)$,即 Q 的第 3 行;令 $Q'_3 = (Q_3^{-1})^T$,即将 Q_3 中元素为 0 的换为 1,将 Q_3 中元素为 1 的换为 0,且将 Q_3 转置,变为列向量。

步骤⑥:送电断面 $T = (Q_2 * Q'_2) \otimes A$,即将 Q_2 和 Q'_2 相乘以后和邻接矩阵 A 相与。

步骤⑦:受电断面 $R = (Q'_3 * Q_3) \otimes A$,即将 Q'_3 和 Q_3 相乘以后和邻接矩阵 A 相与。

输电断面的最终搜索结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 送电断面搜索结果

送电断面	1	2	3	4	5	6
	l_{1-2}	l_{2-3}	l_{3-6}	l_{4-5}	l_{5-6}	l_{5-7}
包含线路		l_{4-5}	l_{4-5}	l_{4-2}	l_{5-7}	
					l_{4-2}	

表 2 受电断面搜索结果

受电断面	1	2	3	4	5
	l_{1-2}	l_{2-3}	l_{3-6}	l_{4-5}	l_{5-7}
包含线路	l_{4-2}	l_{5-6}	l_{5-6}	l_{3-6}	
	l_{5-6}				

将表 1 和表 2 中的送电断面、受电断面集合起来形成输电断面,剔除输电断面中重复的断面,则输电断面的个数将从 11 个减为 9 个;另外,送电断面中断面 5 将网络分为 3 个不连通的部分,这与实际中控制的输电断面不符,故将其删除,则输电断面的总个数变为 8 个。至此,区域间的输电断面的搜索结束。

2.2 区域内部输电断面的搜索

对实际运行的电网来说,区域内部即各地市输电的网架结构基本上以 220 kV 为主,而现有文献对区域内部输电断面的搜索很少,因此这里对区域内部 220 kV 的输电断面的搜索进行了研究。

根据对各地市 220 kV 等级的输电断面的特征进行研究,发现区域内部的输电断面不同于区域间的输电断面。区域间的输电断面是电网的一个割集,而对于区域内部的输电断面来说,输电断面是电网中一个割集中的全部线路或若干条线路,此类输电断面在电网运行中广泛出现,尤其是负荷较重的时候,受到了运行人员越来越多的关注。

电力系统运行时,定义电网中的关键线路是指在电能传输过程中起到关键作用的线路。当关键线路发生故障时,潮流发生大规模的转移,有可能引起

连锁故障,对电网的伤害非常大;而负载重的线路相对来说更容易发生故障,因此将负载重的线路和关键线路称为电网中的脆弱线路,需要对其进行识别和监控,找到相关的输电断面,方便运行人员的实时监控。

2.2.1 脆弱线路的识别

当电网中节点对 $s、t$ 间(不必有支路直接相连)的传输功率变化了 ΔP_{st} 时,即节点 $s、t$ 的有功注入功率分别变化 $+\Delta P_{st}$ 和 $-\Delta P_{st}$,其他节点有功注入功率不变,线路 l_{i-j} 潮流变化 ΔP_{ij} 为

$$\begin{cases} \Delta P_{ij} = |T_{st}(l)| \Delta P_{st} \\ T_{st}(l) = \frac{X_{is} - X_{it} - X_{js} + X_{jt}}{x_{ij}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $T_{st}(l)$ 为功率传输转移分布因子,表示发电机节 s 点和负荷节点 t 发生单位有功功率的变化在线路 l_{i-j} 引起的有功功率变化量; X_{is} 为电力网络中节点电抗矩阵第 i 行、第 s 列的元素; X_{it} 、 X_{js} 、 X_{jt} 分别为表示网络节点电抗矩阵中对应行和列的元素; x_{ij} 表示线路 l_{i-j} 的电抗值。

功率传输转移分布因子 $T_{st}(l)$ 只和电网的拓扑结构有关系,因此方便计算; $T_{st}(l)$ 越大,表明线路被节点对 $s、t$ 利用的越充分。

1) 关键线路的识别

关键线路的识别经历了由无向图到有向图、由无权图到有权图的转变,最初采用边介数的概念来识别电力系统中的关键线路。

边介数:网络中所有发电机节点和负荷节点之间的最短路径经过该边的次数与网络中所有发电机节点和负荷节点之间总的最短路径数之比。

用边介数来识别网络中的关键线路具有一定的局限性,因为根据基尔霍夫定律,电流不止沿着最短路径来传输,而是沿着所有可能的路径流通。文献[15-17]分别采用电气介数、功率介数等来识别电网的关键线路。这里针对电网自身的传输特点,用关键介数 $B_{ij}(l)$ 的大小来表征线路在电能传输过程中所起作用的大小, $B_{ij}(l)$ 的定义式为

$$B_{ij}(l) = \sum_{i \in G, j \in D} C_{st} |T_{st}(l)| \quad (3)$$

$$C_{st} = \min_{l \in L} \frac{p(l)}{|T_{st}(l)|} \quad (4)$$

式中: C_{st} 表示电网当前运行方式下发电机节点 s 和负荷节点 t 之间的功率传输量; $p(l)$ 表示当前运行方式下线路 l 的有功功率; G 表示网络中所有发电

机节点; D 表示网络中所有负荷节点; L 表示网络中所有输电线路。

2) 重负载线路的识别

对于区域内部的电网来说,最容易引起事故的就是正常运行时系统中负荷比较重的线路。当线路的传输功率长期接近甚至高于线路热稳定限额时,线路保护就会动作或者线路容易因为弧垂增大而接触树枝等引起线路短路,该线路的潮流会迅速转移到其他线路,这时候就容易引起其他线路的过载而发生连锁故障。

重负载线路:线路的安全裕度小于某个门槛值的线路。

线路 l_{i-j} 的安全裕度 $M(l)$ 的定义为

$$M(l)=1-\frac{P_l}{P_{l,\max}} \tag{5}$$

式中: P_l 为电网当前运行方式下线路的有功功率; $P_{l,\max}$ 为线路 l_{i-j} 的热稳定限额。

3) 指标归一化

将关键介数 $B_{ij}(l)$ 和线路安全裕度 $M(l)$ 按照下式进行归一化得到 $B_{ij}^*(l)$ 和 $M^*(l)$,从而得到脆弱度指标 $V^*(l)$,求取脆弱线路。

$$K^*(l)=\frac{K(l)-K_{\min}}{K_{\max}-K_{\min}} \tag{6}$$

式中: $K(l)$ 为原始数据; $K_{\max}$ 为该组数据中的最大值; $K_{\min}$ 为该组数据中的最小值。

脆弱度指标 $V^*(l)$ 的计算公式为

$$V^*(l)=0.5B_{ij}^*(l)-0.5M^*(l) \tag{7}$$

式中:0.5表示关键介数 $B_{ij}^*(l)$ 的权值;-0.5表示线路安全裕度 $M^*(l)$ 的权值。

脆弱度指标 $V^*(l)$ 越大,说明线路越脆弱,需要重点监控。将电网中所有线路的脆弱度指标进行从大到小排序,对脆弱线路的选择可以根据当时的电网运行情况自行进行确定。由于计算速度的限制以及实际电网运行的经验,不可能对区域内所有线路进行开断试验,因此选取脆弱度指标排序中前30%的线路为脆弱线路进行研究。

2.2.2 基于潮流转移的输电断面搜索

1) 支路开断分布因子

电网中支路有功潮流的变化可能是由于1条支路或几条支路开断引起的,设基态情况下支路 l_{k-m} 的有功功率为 P_l ,支路 l_{k-m} 开断会引起支路 l_{i-j} 上的潮流发生变化,变化量为 ΔP_{ij}^{km} ,两者之间的关系用

D_{ij-km} 表示。

$$\begin{cases} \Delta P_{ij}^{km}=D_{ij-km}P_l \\ D_{ij-km}=\frac{x_{km}(X_{ik}-X_{im}-X_{jk}+X_{jm})}{x_{ij}(x_{km}-X_{kk}-X_{mm}+2X_{km})} \end{cases} \tag{8}$$

式中: D_{ij-km} 为当支路 l_{k-m} 在基态情况下流过单位电流时,在该支路开断后,将会在其他支路中引起的电流增量; x_{km} 、 x_{ij} 分别为线路 l_{k-m} 、 l_{i-j} 的电抗; X_{ik} 、 X_{im} 、 X_{jk} 、 X_{jm} 、 X_{km} 、 X_{kk} 、 X_{mm} 分别为节点电抗矩阵中的相对应行和列的元素。

2) 电网潮流转移特征

当电网中某条线路 l_{i-j} 断开时,由于开断瞬间发电机和电动机的转速不会发生突变,因此假设电网中所有节点的注入功率不变,可以认为开断线路 l_{i-j} 两端节点 i 、 j 传输的功率不变,只是原来的传输路径发生变化。而新的潮流传输途径则可以看作由开断线路的 i 功率送端节点到功率受端节点 j 的其他路径。由电路的基本原理可知,当线路两端的电压不变时,线路中的电流大小与线路的阻抗成反比,因此可以将寻找新的潮流传输途径转变为寻找以开断线路送端节点 i 为起点、功率受端节点 j 为终点的总电抗值比较小的路径。

在潮流转移路径的选择中,不仅仅要选择出从功率送端节点到功率受端节点的最短路径,而且还要选出倒数第2条最短路径、倒数第3条最短路径等等。如图2所示的8节点系统,假设各条线路的电抗值为: $X_{5-4}=X_{6-5}=X_{1-6}=X_{1-8}=X_{8-4}=0.03$; $X_{1-2}=X_{2-3}=X_{4-3}=0.1$; $X_{2-7}=X_{3-7}=0.125$ 。当线路 l_{2-3} 因故障断开后,如图2(a)所示,可以看作是线路开断前的网络(图2(b))和等值网络(图2(c))的叠加。图2(c)中,电流源 I_s 的大小为开断前网络中线路 l_{2-3} 流过的电流大小,电流沿着3条路径发生转移,如表3所示。

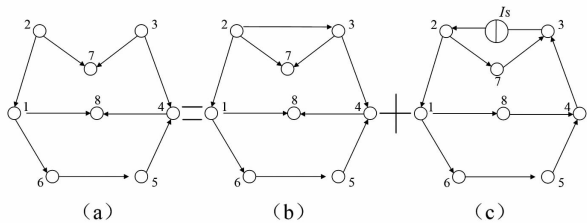


图2 8节点系统

3) 潮流转移路径的选取

由上面的潮流转移特征可知,开断线路一般只会影响其周围的线路。考虑线路的潮流以及热稳定

极限功率,根据实际运行经验,选取支路开断分布因子 $D_{ij-km} \geq 0.2$ 的线路作为开断线路联系紧密的相关线路。

表3 8节点系统潮流转移路径分析

路径节点号	路径长度	线路电流
2-7-3	0.25	$I_{2-7} = I_{7-3} = 0.485\ 6I_s$
2-1-8-4-3	0.26	$I_{2-1} = I_{4-3} = 0.514\ 4I_s$ $I_{1-8} = I_{8-4} = 0.308\ 6I_s$
2-1-6-5-4-3	0.29	$I_{2-1} = I_{4-3} = 0.514\ 4I_s$ $I_{1-6} = I_{6-5} = I_{5-4} = 0.205\ 8I_s$

假设开断线路 l_{k-m} 起点 k 和终点 m 之间的每条路径的总电抗值都相等,而且每条路径中都没有与其他路径重复的线路。若开断线路 l_{k-m} 起点 k 和终点 m 之间共有5条路径,则依据基尔霍夫电流定律,每条路径上的线路的开断分布因子 $D_{ij-km} = 0.2$,即流过的电流为开断线路上原有电流的1/5。但实际电路中不可能2个节点之间的所有路径的总电抗值都相等,而是电抗值应该随着路径条数的增加而增加,因此第5条最短路径中的线路开断分布因子 D_{ij-km} 应该小于0.2;而且2个节点间可能有不小于5条路径,每增加1条路径,由于线路的分流作用,第5条路径中各条线路的开断分布因子 D_{ij-km} 将小于0.2。为了不遗漏支路开断分布因子 $D_{ij-km} \geq 0.2$ 的线路,这里采用搜索前 K 条最短路径的方法,其中 K 的取值由上面所述为: $K = (1/D_{ij-km}) - 1$ 。

4) 路径中控制线路的选取

搜索得到的前 K 条最短路径中的线路是受开断线路潮流转移影响较大的线路,但是在实际的调度运行过程中,输电断面一般是以电网中割集的形式或者是电网割集中的某几条线路的形式组成,这样才能够在输电断面的基础上制定一系列的运行规则,比如说输电断面的输电能力等。而通过前 K 条最短路径搜索的方法,搜索到的是些串联的线路,没有办法在这些线路上制定运行规则来保证系统的安全稳定运行,因此需要对搜索到的线路进一步地筛选。

每条路径上的线路输送电力的能力实际上取决于线路安全裕度最小的那条线路,即要选取安全裕度最小的线路作为该线路所在路径的控制线路,与开断线路共同构成输电断面。若某条路径中选出来的安全裕度最小的线路也正好在其他路径中,则将

该线路作为这两条路径的控制线路。如图2(c)所示,假设经过计算,第1条最短路径中安全裕度最小的线路为 l_{2-7} ;第2条最短路径中安全裕度最小的线路为 l_{2-1} ;第3条最短路径中安全裕度最小的线路为 l_{1-6} ;此时线路 l_{2-1} 和线路 l_{1-6} 为第3条路径中的串联线路,线路 l_{2-1} 的开断分布因子 D_{ij-km} 大于线路 l_{1-6} 的开断分布因子,且线路 l_{2-1} 同时第2条和第3条最短路径上,因此选择线路 l_{2-1} 为第2条和第3条最短路径中的控制线路 l_{2-3} ,最终选出与线路相关的输电断面为 $\{l_{2-3}, l_{2-1}, l_{2-7}\}$ 。

3 算例分析

为验证所提方法的有效性,以某省实际电网某高峰负荷期为研究对象,分别进行区域间和区域内输电断面的搜索。对电网进行简化处理后,该省网分为21个分区,如图3所示。

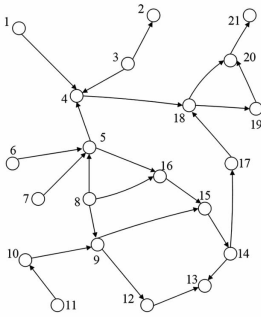


图3 某省电网地理分区图

运用所提方法,求得该省区域间的输电断面个数为31个,包含了运行调度人员给出的输电断面,说明此方法的准确性。在不同的运行方式下,调度运行人员只需要分析该31个输电断面,确定需要监控的输电断面即可,大大减小了计算量。

分区5为该省的省会城市,输电线路比较复杂,电网部分接线图如图4所示。下面以分区5为例对区域内的输电断面进行搜索。

表4列出了通过所提方法搜索到的部分输电断面。仿真表明,所得到的区域内部输电断面几乎覆盖了绝大多数实际运行中调度专家所重点监控的输电断面,该结论与广泛大范围停电事故的特征及分析结果是一致的。所提方法搜索结果遗漏了一些实际中监控的输电断面,经过验证,在上述的运行方式数据下,这些断面中的线路安全裕度比较大,不需要

监控。另外,还搜索到一些运行专家没有给出的输电断面,值得运行调度人员注意。

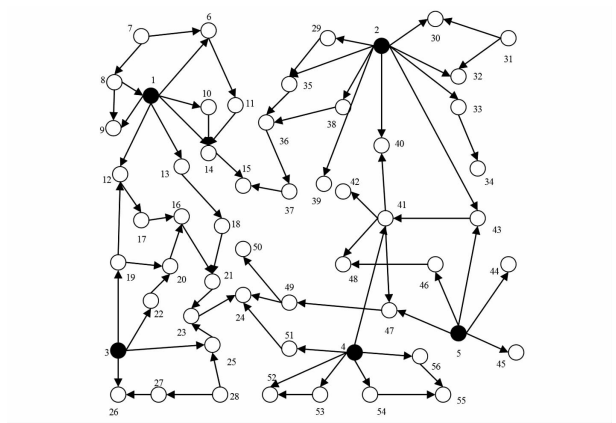


图4 某分区电网系统图

表4 输电断面搜索结果

输电断面序号	输电断面组成
1	$l_{2-35} \setminus l_{2-38} \setminus l_{29-35}$
2	$l_{16-21} \setminus l_{18-21}$
3	$l_{31-30} \setminus l_{31-32}$
4	$l_{21-23} \setminus l_{25-23}$
5	l_{41-42}
6	$l_{1-10} \setminus l_{1-14} \setminus l_{6-11}$
7	$l_{7-6} \setminus l_{7-8}$
8	$l_{12-17} \setminus l_{19-20}$
9	$l_{5-43} \setminus l_{5-47}$

4 结 论

通过对潮流转移特征以及实际运行中电网调度人员对输电断面的需求进行分析,在地理分区的基础上对交界厂站优化后进行分区,提出分别以区域间和区域内进行输电断面的搜索;综合考虑线路实际潮流以及线路热稳定极限的影响,最终找到适合调度人员监控的输电断面。所提方法不仅可以在离线状态下求出复杂网络的输电断面,大大减少人工计算的时间,而且可以在大电网发生故障时,将系统安全分析的范围缩小到输电断面相关的线路,有利于连锁故障的预防。

参考文献

[1] 周德才,张保会,姚峰. 基于图论的输电断面快速搜索[J]. 中国电机工程学报,2006,26(12):32-38.

[2] 赵峰,孙宏斌,张伯明. 基于电气分区的输电断面及其自动发现[J]. 电力系统自动化,2011,35(5):42-46.

[3] 雷成,刘俊勇,刘友波,等. 基于状态分区的输电断面快速搜索[J]. 华东电力,2013,41(3):558-561.

[4] 任建文,魏俊姣. 基于GN分区的输电断面快速搜索[J]. 现代电力,2015,32(3):42-48.

[5] 侯俊贤,韩民晓,董毅峰,等. 基于子网络收缩的输电断面搜索方法[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(12):92-97.

[6] 罗钢,陈金富,石东源,等. 基于复杂网络理论的关键输电断面分析[J]. 中国电机工程学报,2013,33(25):147-155.

[7] 王涛,李渝,顾雪平,等. 考虑地理分区边界优化的电网关键输电断面辨识[J]. 电工技术学报,2014,29(4):220-228.

[8] 苗世洪,马帅,尚亚男,等. 基于割点和路径搜索的输电断面快速识别方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(2):39-45.

[9] 王增平,李刚,任建文,等. 基于前K最短路径的输电断面搜索新方法[J]. 电工技术学报,2012,27(4):193-201.

[10] 任建文,李刚,王增平,等. 基于背离路径的输电断面搜索新算法[J]. 电网技术,2012,36(4):121-127.

[11] 张富超,钟成元,张富春,等. 基于源流路径剖分的输电断面快速搜索[J]. 电路系统保护与控制,2015,43(12):8-13.

[12] 杨文辉,毕天姝,薛安成,等. 基于图论的潮流转移路径的快速搜索[J]. 电网技术,2012,36(4):84-88.

[13] 程临燕,张保会,郝治国,等. 基于线路功率组成的关键断面快速搜索[J]. 电工技术学报,2010,30(10):50-56.

[14] 卢开澄. 图论及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,1995.

[15] 曹一家,陈晓刚,孙可. 基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路辨识[J]. 电力自动化设备,2006,26(12):1-5.

[16] 梁才,刘文颖,但扬清,等. 输电线路的潮流系数及其在关键线路识别中的应用[J]. 电力系统自动化,2014,38(8):35-40.

[17] 王涛,高成彬,顾雪平,等. 基于功率系数的电网关键环节辨识[J]. 电网技术,2014,38(7):1907-1913.

作者简介:

杨文武(1992),硕士,主要从事电力系统运行与控制。
(收稿日期:2016-11-10)

基于一种快速幂次滑模趋近律的电力系统混沌控制

路 尧

(四川大学电气信息学院,四川 成都 610065)

摘要:存在于电力系统中的混沌振荡如若不及时加以控制,将会造成停电事故等危害。为分析一个二阶电力系统的混沌振荡动力学行为,采用李雅普诺夫指数图的方法,并有针对性地对指数趋近律、比例积分控制等传统滑模趋近律所暴露的抖振现象、收敛速度慢以及动态响应不平滑等问题加以改进,进而提出一种快速幂次滑模趋近律。仿真实验结果表明,此方法可大幅度改善系统动态过程并有效消除抖振,且具有优越鲁棒性。

关键词:电力系统混沌振荡;指数趋近律;比例积分控制;快速幂次滑模趋近律

Abstract:If the chaos oscillation in power system cannot be controlled in time, it will cause power outages and other hazards. In order to analyze the dynamic behavior of chaotic oscillation of a two order power system, the method of Lyapunov exponent chart is adopted. The problems about the chattering phenomenon, slow convergence speed and non-smooth dynamic response exposed by the traditional sliding mode reaching laws such as the exponential reaching law and the proportional integral control are improved, and then a fast power sliding mode reaching law is proposed. The simulation results show that the proposed method can greatly improve the dynamic process of the system and eliminate the chattering effectively, and it has excellent robustness.

Key words:chaos oscillation in power system; exponential reaching law; proportional plus integral control; fast power sliding mode reaching law

中图分类号:TM732 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2017)02-0062-04

0 引言

随着电力系统规模的不断发展和增大,外界扰动引起的电压失稳常导致混沌振荡的产生。而对于电力系统这样一个强耦合、非线性的动态系统,其动力学行为^[1]受其自身参数的影响。外界扰动幅值达到一定条件将会使系统出现混沌振荡^[2-6],系统会出现解列,进而出现停电事故。近些年发生在一些国家的大停电事故就是由混沌振荡导致的。

因此,国内外学者纷纷对混沌振荡产生机理进行探究分析。文献[7]将不同失稳模式下的电力系统与混沌振荡的关系进行了阐述。文献[8]研究了电力系统混沌动力学行为在负荷扰动和有界噪声下的轨迹。文献[9]将电压失稳与混沌分叉之间的关系进行了详述。文献[10]利用 Melnikov 方法和椭圆积分法研究了二阶电力系统混沌振荡的条件。

目前用于电力系统混沌控制的方法有很多种,

如比例积分控制、滑模控制^[11]等。滑模控制因其在控制过程中强大的对外扰动鲁棒性而被广泛应用,但随之而来的抖振问题却对系统控制的精确性和耗能产生严重影响,更有甚者引发系统失稳。因此,如何使系统在最快趋近于稳定状态的过程中消除抖振成为研究重点。针对控制抖振方面的问题,国内外学者有很多研究。由于常规 PI 控制存在比例、积分系数难整定,动态响应速度慢,易产生超调,并且纯积分环节难以无差地跟踪正弦形式的混沌振荡信号等一系列缺点。

下面分析了二阶电力系统模型的动力学行为,并在指数趋近律的滑模控制基础上提出了一种快速幂次的滑模趋近律。在保证系统以更快速度趋近滑模面的同时,针对趋近律的鲁棒项进行了改进,缩短了系统逼近滑模面所用的时间,有效抑制了抖振。数字仿真实验表明,所提出的快速幂次滑模控制方法优于常规 PI 控制和指数趋近律的滑模控制,验证了该方法对平息电力系统混沌振荡的可行性和有效性。

1 电力系统模型及其动力学分析

1.1 数学模型

采用同步电动机的二阶电力系统简化模型,该模型方程如下:

$$\begin{cases} \frac{d\delta(t)}{dt} = \omega(t) \\ H \frac{d\omega(t)}{dt} = -P_{\max} \sin\delta(t) - D\omega(t) + P_m + P_{\xi} \cos\beta t \end{cases} \quad (1)$$

式中: δ 、 ω 为两台电机之间的相对电角度和相对转速,即 $\delta = \delta_1 - \delta_2$, $\omega = \omega_1 - \omega_2$; $P_{\max}$ 为电机的电磁功率; P_m 为电机的输入机械功率; P_{ξ} 和 β 分别为系统扰动负荷幅值和频率; D 、 H 为阻尼系数和等值时间惯性常数。

1.2 混沌振荡现象的产生^[12]

为便于研究,将式(1)中第二式参数分别除以 H , 并取 $a = \frac{P_{\max}}{H} = 1$, $b = \frac{D}{H} = 0.02$, $C = \frac{P_m}{H} = 0.2$, $F = \frac{P_{\xi}}{H} = 0.2593$, $\beta = 1$, $H = 100$, 则可得简化公式为

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega \\ \dot{\omega} = -\sin\delta - 0.02\omega + 0.2 + 0.2593\cos t \end{cases} \quad (2)$$

同时取初值 $(\delta_0, \omega_0) = (0.43, 0.003)$, 并在此条件下观察系统的动力学行为,如图1所示。系统相图上的功角和频率的关联关系验证了混沌振荡的产生。

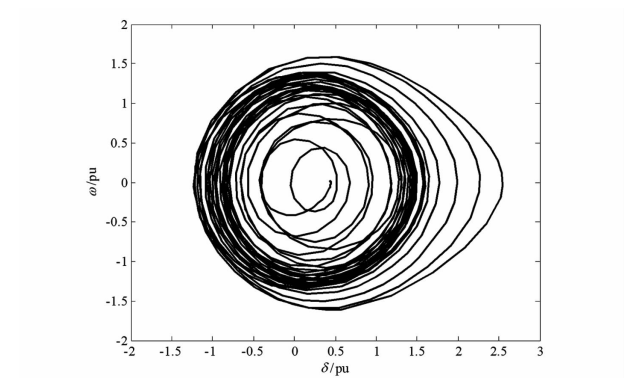


图1 系统发生混沌振荡的平面相图

周期性的负荷扰动达到一定数值将会引起系统产生混沌振荡现象。因此,在以上给定初值条件下计算系统于负荷扰动变化时的李雅普诺夫指数,并绘制指数图,如图2所示。

由图2可知,系统有两个李雅普诺夫指数,且最大值为正值,证明其已经处于混沌振荡状态。同时,

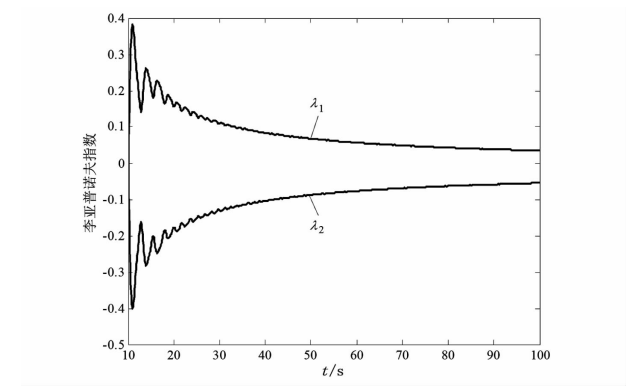


图2 系统李雅普诺夫指数变化曲线

亦可从系统的时域图(图3)上观察到,当混沌振荡发生时,系统功角和角速度分别都处于非周期、无规则的振动。此状态将会对电力系统稳定性产生严重影响,甚至可能引发大规模停电。

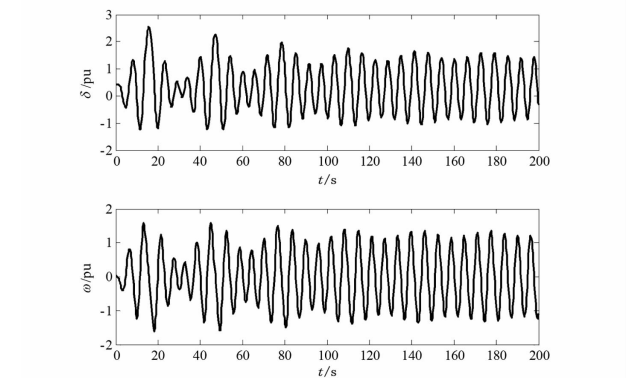


图3 系统混沌振荡状态时功角和角速度时域曲线图

2 基于一种快速幂次趋近律的滑模控制器设计

2.1 常规滑模控制基本原理

滑模控制即滑模变结构控制,其根据系统特定要求的动态特性设计滑模面,并依据特定的控制律迫使系统状态沿特定路径运动收敛到该切换平面,进而在此平面上运动至控制目标。由于传统滑模变结构控制存在严重抖振问题,使得系统状态在进入滑模面时产生高频抖动,表现形式为在切换平面附近上下穿越,故而增加能耗,降低精确性。为削弱抖振,加快趋近速度,在原有指数趋近律的基础上设计了一种基于快速幂次趋近律的滑模控制,使得系统状态在快速收敛接近滑模面的同时能够平滑运动至控制目标。

2.2 快速幂次滑模趋近律

为达到消除系统抖振的目的,高为炳教授提出

了等速趋近律、指数趋近律等比较实用的趋近律,通过改变适当参数来优化系统趋近过程的运动轨迹,进而使滑动模态得以较好实现。相较而言,等速趋近律存在趋近速度慢的问题,而指数趋近律虽然在远离滑模面的趋近阶段速度较快,但因含有常数项,故而在靠近滑模面时易产生较大抖振。因此,为了保持系统在趋近滑模面运动过程的高速率以及靠近并进入滑模状态时的平滑性,下面提出一种快速幂次滑模趋近律。

分别给出指数趋近律和快速幂次趋近律的表达式如下:

$$\dot{s} = -ks - \varepsilon \operatorname{sgn}(s), s(0) = s_0 \tag{3}$$

$$\dot{s} = -k_1 s - k_2 |s|^a \operatorname{sgn}(s), s(0) = s_0 \tag{4}$$

不难看出,式(3)的指数项将保证系统状态能够快速收敛并接近滑模面,但式中第二项却会使其在进入滑模面时产生上下穿越滑模的效果,故而产生明显抖振。其中 $k > 0, k_1 > 0, k_2 > 0, \varepsilon > 0, 0 < a < 1$ 。由式(4)知,当系统状态向滑动模态趋近时,指数项能够保证其趋近速度;而这也同时弥补了幂次项在滑模趋近阶段速度不足的问题,进而于此前提下发挥幂次项在接近滑模面时能放缓收敛速度并平滑进入滑模阶段,相比于指数趋近律,有效地消除了系统抖振。

2.3 控制器设计

对比于式(2),处于混沌振荡状态下的系统方程需在式(2)中加入控制量 u ,且令控制目标为发电机功角,即为状态变量 $x_1 = \delta$ 。故受控系统可写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\sin x_1 - 0.02x_2 + 0.2 + 0.2593\cos t + u \end{cases} \tag{5}$$

取受控系统式(5)跟踪目标 $r(t) = 0$,则系统状态变量引起的误差向量为

$$\begin{cases} e_1 = x_1 - r \\ e_2 = x_2 - \dot{r} \end{cases} \tag{6}$$

其中, $\dot{e}_1 = e_2, \dot{x}_1 = x_2$,式(6)又可简化为

$$\begin{cases} e_1 = x_1 \\ e_2 = x_2 \end{cases} \tag{7}$$

故而式(5)可记为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = -\sin e_1 - 0.02e_2 + 0.2 + 0.2593\cos t + u \end{cases} \tag{8}$$

常规滑动模态即滑模面可设为 $s = ce_1 + e_2$,则其导数形式为

$$\begin{aligned} \dot{s} = \dot{ce}_1 + \dot{e}_2 = ce_2 - \sin e_1 - 0.02e_2 + 0.2 + \\ 0.2593\cos t + u \end{aligned} \tag{9}$$

由所采用指数趋近律

$$\dot{s} = -ks - \varepsilon \operatorname{sgn}(s) \tag{10}$$

可以得到相应的控制律为

$$\begin{aligned} u = -ce_2 + \sin e_1 + 0.02e_2 - 0.2 - 0.2593\cos t - \\ ks - \varepsilon \operatorname{sgn}(s) \end{aligned} \tag{11}$$

若采用所提及的快速幂次趋近律

$$\dot{s} = -k_1 s + k_2 |s|^a \operatorname{sgn}(s) \tag{12}$$

则可知控制律为

$$\begin{aligned} u = -ce_2 + \sin e_1 + 0.02e_2 - 0.2 - 0.2593\cos t - \\ k_1 s - k_2 |s|^a \operatorname{sgn}(s) \end{aligned} \tag{13}$$

为突出以上两种趋近律的优越性,此处引入传统 PI 控制进行参考比较,其控制律即 $u = k_p(x_1 - r) + k_i \int (x_1 - r) dt$,则其化为

$$u = k_p x_1 + k_i \int x_1 dt \tag{14}$$

控制律的选择直接关系到控制器的优劣,所以除了选取 PI 控制作为基准对照,还分别采用指数趋近律和快速幂次趋近律的滑模趋近过程对比图,来验证其各自趋近阶段的收敛快慢以及动态品质特点。

3 算例仿真

分别采用基于指数趋近律、快速幂次趋近律的滑模控制来对电力系统混沌振荡进行平抑。设系统参数为 $a = 1, b = 0.02, c = 0.2, F = 0.2593, H = 100$;PI 控制器参数为 $k_p = 50, k_i = 0.1$;指数趋近律控制器的参数为 $k = 5 \times 10^3, \varepsilon = 5$;快速趋近律的控制器参数为 $k_1 = 5 \times 10^3, k_2 = 5, c = 150$ 。

系统初值为 $(\delta_0, \omega_0) = (0.43, 0.003)$, Simulink 仿真 100 s,得出 3 种不同控制条件下的功角误差控制曲线,如图 4 所示。处于混沌振荡状态下的电力系统功角误差在基于两种趋近律控制器作用下,呈明显收敛趋势,并逐渐恢复至系统同步。而 PI 控制下的功角跟踪误差却表现出幅值围绕零点做随时间缓慢减小的振荡运动。相比之下,前两种控制方案能使系统误差在有限时间内快速平滑收敛至 0,并削弱了抖振,从而减少了控制输入能量。

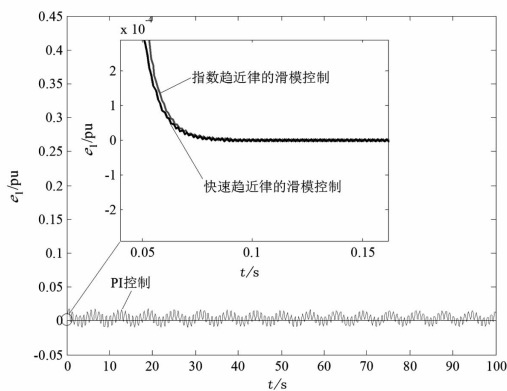


图4 电力系统功角时间变化图

综合前两种控制策略的比较,所提出的基于快速幂次趋近律的滑模控制在远离滑模面时与基于指数趋近律控制方案的趋近速度相近,但在接近滑模面时却表现出慢速平滑的特性,这是由于趋近律用幂次项函数代替了符号函数。故相较于后者,能有效消除其因进入滑模面时速度过快引起的系统抖振现象,并减小其控制输入振幅,从而达到减小控制输入能量的目的,表现出了3种方案之中的最优控制性能。

4 结 语

运用李雅普诺夫指数图对一个二阶电力系统混沌振荡动力学行为进行详细分析;并针对指数趋近律、PI控制律所暴露出的抖振现象、收敛速度慢、动态响应不平滑等问题,提出了一种基于快速幂次趋近律的滑模控制方案来有效平抑系统振荡至恢复同步,得到了显著的收效。仿真结果表明,基于此趋近律的控制策略对系统状态在远离滑模面时能保证其快速收敛,而在接近滑模面时能使系统状态慢速平滑地进入,显著地改善了系统在控制阶段的运动品质;并有效地削弱了抖振,减小了控制能量,显示了其优质鲁棒性,在未来控制发展领域将会有不错的应用。

参考文献

[1] 卢强,孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京:科学出版社,1993.

[2] Huerta H, Loukianov A G, Canedo J M. Robust Multi-machine Power Systems Control via High Order Sliding Modes[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(7): 1602 - 1609.

[3] AE Aroudi, R Giral, J Calvente, et al. Synthesis of Loss-free Resistors Based on Sliding-mode Control and Its Applications in Power Processing[J]. Control Engineering Practice, 2013, 21(5): 689 - 699.

[4] 袁雷, 沈建清, 肖飞, 等. 插入式永磁低速同步电机非奇异终端滑模观测器设计[J]. 物理学报, 2013, 62(3): 1 - 9.

[5] 朱方, 赵红光, 刘增煌, 等. 大区电网互联对电力系统动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 1 - 7.

[6] 杨国良, 李惠光. 直驱式永磁同步风力发电机中混沌运动的滑模变结构控制[J]. 物理学报, 2009, 58(11): 7552 - 7557.

[7] Yu Y X, Jia H J, Li P, et al. Power Systems Instability and Chaos[J]. Electric Power Systems Research, 2003, 65(3): 187 - 195.

[8] Wei D Q, Luo X S, Qin Y H. Studying Chaos in Power System under Load Perturbation and Bounded Noise[C]// 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering, Wuhan; IEEE Conference Publications, 2010: 2185 - 2188.

[9] 薛禹胜, 周海强, 顾晓荣, 等. 电力系统分岔与混沌研究述评[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(16): 9 - 15.

[10] Chen X W, Zhang W N, Zhang W D. Chaotic and Subharmonic Oscillations of a Nonlinear Power System[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2005, 52(12): 811 - 815.

[11] 许燕青, 毛家松, 刘建峰, 等. 基于同步思想的电力系统混沌滑模变结构控制[J]. 电测与仪表, 2012, 49(8): 27 - 31.

[12] 倪骏康, 刘崇新, 庞霞, 等. 电力系统混沌振荡的等效快速终端模糊滑模控制[J]. 物理学报, 2013, 62(19): 1 - 7.

作者简介:

路 尧(1989), 硕士研究生, 从事电力系统混沌振荡、电力市场方面的研究。

(收稿日期: 2016 - 12 - 04)

智能变电站层次化继电保护配置优化的探讨

张 尧^{1,2},陈福锋^{1,2},陈 实^{1,2}

(1. 国电南京自动化股份有限公司,江苏 南京 210032;
2. 南京国电南自电网自动化有限公司,江苏 南京 211153)

摘 要:讨论了智能变电站中层次化继电保护系统的配置方式,就目前就地保护配置复杂、保护整定繁复、后备保护逐级配合时间长、站域保护工程应用不便等多方面的问题,提出了就地保护的部分后备保护功能向站域保护、区域保护迁移的配置策略;并基于一次设备建模、变电站信息交互来实现就地保护定值自动整定、与就地保护协同的站域后备保护的思路和实例,降低现有继电保护信息流的横向耦合,简化就地保护配置,提升站域后备保护性能。

关键词:智能变电站;层次化继电保护;一次设备建模;自动整定;协同

Abstract: The relay protection configuration in smart substation is discussed. According to the complicated function configuration, uncomfortably setting, long operation time of step-by-step backup protection and inconvenient engineering application of station-domain protection, it is proposed that the part of backup protection function is transferred to the station-domain protection or area protection. And based on primary equipment modeling and device information interaction, the ideas and examples are realized that is local protection setting sets by itself automatically and station-domain backup relay protection is cooperated with local protection to optimize local protection. It can reduce the transverse coupling in the existing relay protection, simplify the local protection configuration and improve the performances of station-domain backup protection.

Key words: smart substation; hierarchical relay protection; primary equipment modeling; auto setting; collaboration

中图分类号:TM771 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2017)02-0066-05

0 引 言

特高压交直流工程建设和分布式新能源的快速发展,给电网调度、运行和控制带来前所未有的复杂性,对于继电保护而言也会面临极大的挑战^[1]。在电网结构变化的同时,中国变电站近年来经历了从传统变电站到数字化变电站、智能变电站、新一代智能变电站等阶段的发展^[1]。对于继电保护,最显著的变化是传统模拟量、电平信号等开关量的输入输出方式变为了数字化的 SV(数字化采样)数据和 GOOSE(面向通用对象的变电站事件)信号^[2]。但除了针对采样数据品质、GOOSE 信号品质的处理外,从功能配置上智能变电站的保护与传统保护没有太大的差异,在原理上更没有较大的变化。

在新一代智能变电站试点建设过程中,提出了层次化继电保护系统,把原有的继电保护划分为就地级保护,增加了站域级、广域级保护控制系统,站域保护集成了部分安全自动装置的功能;并对单套

保护做了冗余配置,但就地级保护还是按照原有的配置方式^[3]。文献[4]提出了就地保护仅配置主保护的方式,并配置站域集中式后备保护的方案。文献[5]提出了分布式站域保护,通过多数数据源提高站域保护的可靠性。另外,对于站域后备保护的实现原理还提出其他一些方式^[6-8]。

目前对于层次化继电保护的研究和应用,主要集中在站域后备保护原理方面,对于就地保护功能配置的优化以及运维的便捷提及较少;同时当站域后备保护的范围扩大后,如何保证其可靠性也是难题之一。

在传统变电站中,装置间的数据获取是通过大量的二次电缆来实现,过多的信息交互势必造成二次回路复杂,系统可靠性降低。智能变电站采用了 IEC 61850 规约后,其最大的优点是信息共享,智能变电站内的站控层、过程层网络是能够让站内任何一个设备获得全站信息,结合线路纵联通道还可获取对侧变电站的信息;同时在 IEC 61850 规约良好的互操作性下,智能变电站信息交互具备良好的基础^[3]。

下面就智能变电站,将现有的继电保护功能分类,并重新分布到层次化继电保护系统中;简化就地保护功能,方便工程运维,利用就地保护和站域保护的协同以及智能变电站信息交互的优势提升站域保护性能;并就功能扩充后可能带来的可靠性问题提出解决方案。

1 现有智能变电站继电保护配置

1.1 线路保护

如图1所示,目前电网通常配置的线路保护根据保护范围主要包括:1)主保护(纵联保护/距离Ⅰ段);2)近后备保护(距离Ⅱ段/零序Ⅱ段);3)邻线远后备保护(距离Ⅲ段/零序Ⅲ段)。由于距离Ⅲ段和零序Ⅲ段在通常整定中按照系统稳定要求来整定,实际上邻线远后备保护是作为系统稳定的后备来使用。由于近后备保护和邻线后备保护的保护区会涉及到相邻设备,因此在整定中必须与相邻设备的后备保护在时间上配合,避免越级跳闸。

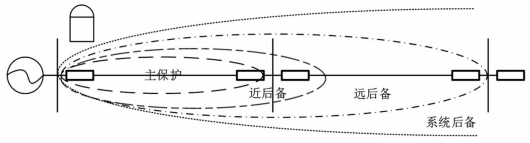


图1 现有线路保护功能配置示意图

1.2 变压器保护

如图2所示,变压器保护主要包括:1)主保护(差动保护);2)近后备保护(阻抗保护、间隙保护、过流和零序保护的方向段);3)远后备保护(过流和零序保护末段)。其中近后备保护主要作为主保护的后备保护,保护范围通常不超过主保护范围,对于过流保护和零序保护在实际整定中往往为了保证相邻设备末端在最小运行方式有足够的灵敏度,也是按照保护系统稳定的系统级后备保护。

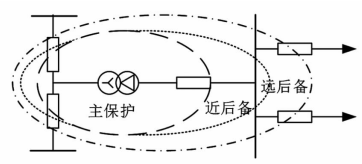


图2 现有变压器保护功能配置示意图

1.3 母线保护

如图3所示,母线保护主要包括:1)主保护(差动保护);2)失灵保护。母线保护通常不配置后备保护,依靠线路保护、变压器保护的后备保护来作为

母线保护的远后备,母线上各间隔断路器的失灵保护通常均由母线保护完成。

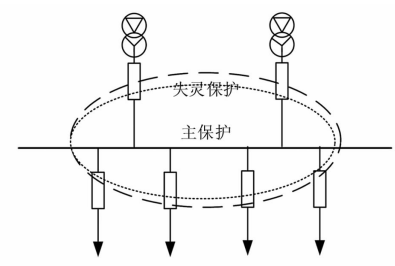


图3 现有母线保护功能配置示意图

1.4 现有配置的一些不足

1) 后备保护逐级配合

线路保护和变压器保护均配置了相邻设备的远后备保护以及作为系统稳定安全的系统级后备保护,这就需要在时间上与邻线或下级设备的后备保护进行配合,尤其对于变压器后备保护涉及的下级设备较多,又作为整个变电站主要的后备保护,造成变压器后备保护配置复杂,在多侧电源的情况下难以整定,甚至出现近后备动作时间大于设备热稳时间,对设备安全运行造成较大的风险。

2) 就地保护间横向耦合

由于母线上各间隔的失灵保护通常都配置在母线保护中,也就使得母线保护和各间隔线路保护、变压器保护之间需要相对复杂的联锁信号,在实际运维中,这也是智能变电站就地保护虚端子配置复杂以及保护设备检修时安全措施不便的原因之一。

3) 后备保护决策依据不足

对于线路保护、变压器保护配置的后备保护范围远大于主保护范围,但受制于保护安装处的测量信息,无法感知系统实际的运行方式及相邻设备电气特征,因此也难以保证在不同运行方式下准确动作,例如线路距离Ⅲ段等。

2 层次化继电保护的优化配置方案

2.1 保护功能的优化分布原则

根据保护范围、是否需要相互配合、综合决策信息来源等因素将就地保护中原有的主保护、后备保护功能在层次化继电保护系统中进行重新组态。

1) 就地保护

就地保护配置被保护对象的主保护、近后备保护及设备安全的后备保护,尽可能避免就地保护之间的横向连接;在保护功能上就地保护不涉及与相

邻设备后备保护在时间或者空间上的配合,如图 4 所示。

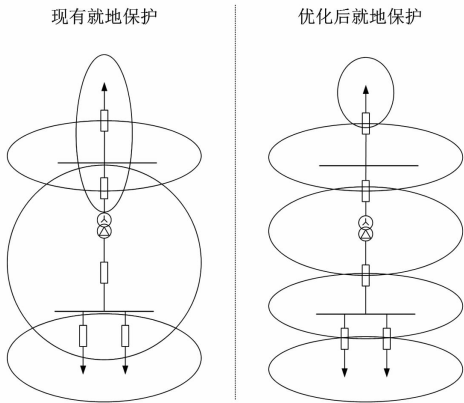


图 4 就地保护配置优化保护范围示意图

2) 站域保护

站域保护与就地保护之间形成纵向连接。由于变电站内主要设备的后备保护大多配置在变压器后备保护中,因此站域保护以原有变压器相关后备保护为主体,形成变电站高压侧母线以下设备的站域后备保护,并将原有就地保护间横向耦合的功能配置到站域保护中。

3) 区域(广域)保护

就地保护中需要相邻变电站及系统运行方式等信息后才能更合理地决策保护功能,例如线路距离Ⅲ段保护、零序Ⅲ段保护、变压器零序末段功能等配置到区域(广域)保护。

2.2 保护功能的优化分布方案

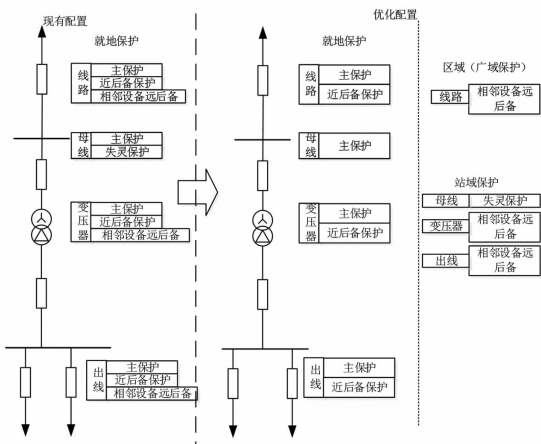


图 5 保护功能优化配置示意图

如图 5 所示的典型变电站接线及保护配置,线路就地保护仅设置纵联保护和距离Ⅰ段,将原有就地线路保护中的相邻设备的远后备如距离Ⅱ段、距离Ⅲ段、零序保护等,在实际应用中受系统运行方式影响、保护整定配合相对复杂、过负荷运行状态下存

在风险的功能布置到区域(广域)保护中,利用区域(广域)保护获取的其他变电站数据信息和运行方式参数信息进行综合决策。

变压器就地保护中仅设置差动保护、间隙保护或者作为变压器近后备的阻抗保护,各侧后备中配置的下级设备后备的功能如过流保护、零序保护等配置到站域保护中。

母线保护中仅设置差动保护,各间隔失灵保护配置到站域保护中,减少就地保护之间的联闭锁。

按照上述配置方式后,就地保护无需与其他保护配合,同时就地保护之间不存在横向连接,使得就地保护配置独立、功能简化,并进一步实现少维护。站域保护以变压器后备保护为主体,利用智能变电站站内交互提高保护性能。

3 信息交互实现保护优化

3.1 就地保护定值的自动整定

由于就地保护仅配置了被保护对象的全线速动功能,保护功能大大简化,可以利用智能变电站信息交互来实现保护定值的自动整定。

定值整定通常需要一次设备参数,根据整定原则设置定值项,再通过系统运行方式参数校验其灵敏度是否符合要求。整定原则一般是固定的,因此如果保护能够自主获取一次设备参数和最小系统运行方式的短路参数,就能够实现定值的自动整定。

在 IEC 61850-7-4 中,定义了主要一次设备的逻辑节点(LN),如 YPTR(电力变压器)、TCTR(电流互感器)、TVTR(电压互感器)等^[9]。对于保护所需的 TA 变比、TV 变比、变压器参数、线路参数均有相应的 DO(数据对象)或 DA(数据属性)可以进行描述,但像变压器短路电压比等参数可能需要扩充相应的 DO。

如图 6 所示,在变电站设计完成并建立 SSD(系统规范描述文件)时对于所需的一次设备及其参数进行建模,经过集成商完成 SCD(变电站系统配置文件)文件配置后,由装置导出 CID(IED 配置文件)时获取并存储相关所需的参数。

对于最大、最小运行方式,目前通常是通过调度方式部门人工流转给出,可通过远方 EMS(电力管理系统)主站获取当前站点的短路参数及不同运行方式下的短路参数;站端 EMS 系统子站提供 MMS

(制造报文规范)服务,就地保护通过 MMS 获取当前站点各电压等级母线处不同运行方式下短路参数、最大负荷等信息。

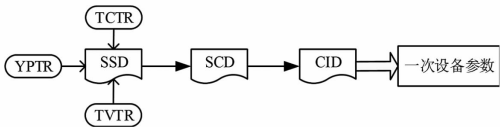


图 6 一次设备参数传递过程

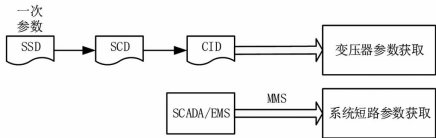


图 7 定值整定参数获取

主保护及本设备的近后备通常以额定电流为基准值,并考虑可靠系数、返回系数、经验值系数等作为整定系数,整定完成后按照最小运行方式进行灵敏度校验。

因此保护装置中可根据功能差异选定整定参数,中间值作为默认值计算,再根据灵敏度校验结果调整参数。

设定整定参数:

$$K_{set} = K_{exp} \frac{K_{rel}}{K_{re}} \tag{1}$$

式中: K_{set} 为基准整定电流的整定系数,下称整定系数; K_{exp} 为经验值系数; K_{rel} 为可靠系数; K_{re} 为返回系数。

可靠系数、经验值系数、返回系数可按照中间值作为缺省值来处理,按照不同系数的阈值,整定系数的可调整阈值为

$$K_{set} \in (K_{setmin}, K_{setmax}) \tag{2}$$

式中: K_{set} 为整定系数; K_{setmin} 为整定系数最小值; K_{setmax} 为整定系数最大值。

选定迭代调整步长:

$$\Delta K_{set} = K_{\Delta} \times (K_{setmax} - K_{setmin}) \tag{3}$$

式中: ΔK_{set} 为整定参数调整步长; K_{Δ} 为调整步长百分比。

K_{Δ} 以保护装置通常最小精确工作电流设置。保护装置通过单向或者双向逼近,在灵敏度条件约束下找到合适的整定参数,确认保护定值。当整定参数越限时,发出整定异常告警提醒,如图 8 所示的流程处理。

3.2 与就地保护协同的站域后备保护

在所提的优化配置中,站域保护配置是以原变压器各侧后备保护为主体、变电站为对象的站域后

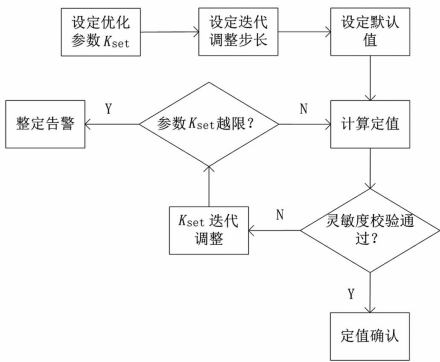


图 8 灵敏度约束的定值自动整定流程图

备保护。站域保护通常采用网络采样方式,能够获取全站各间隔电流、电压数据。

从可靠性角度考虑,站域保护的保护范围越大,其不正确动作造成的后果也越严重。为了防止合并单元输出数据异常或者网络异常时造成保护异常,可以采用与就地保护协同的方式,站域后备保护采用启动元件和选择元件与门构成动作判据。

对于终端负荷变电站,站域后备保护的启动元件可采用电源侧过流元件,由站域保护装置根据采样数据进行计算。对于联络变电站或者存在多侧电源时,可采用差动元件作为启动元件。在各间隔就地保护中,设置灵敏的过流元件和功率方向元件,作为站域后备保护的选择元件,如图 9 所示。

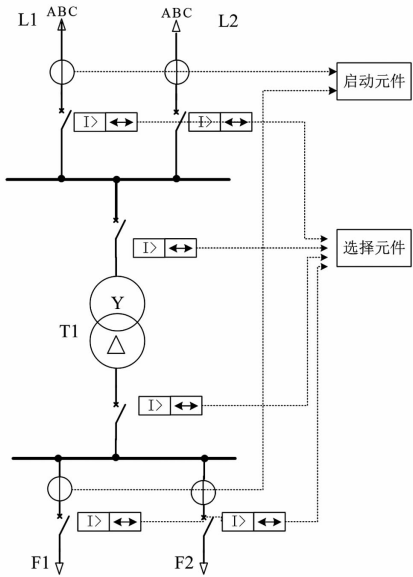


图 9 与就地保护协同的站域后备保护示意图
计算站域差动保护差流:

$$I_d = | \sum_{x=1}^n \dot{I}_x | \tag{5}$$

式中: I_d 为以变电站为对象的差流; $\dot{I}_x$ 为进线、馈线电流; n 为进线及馈线数量。

根据差流 I_d 可以判断故障在区内还是区外。由于变压器低压侧为不接地系统,电流启动元件具备自然的选择性,根据就地安装的馈线保护、变压器低压侧后备保护、低压侧分段保护的启动元件即可判别故障位置。而 110 kV 侧为接地系统,当本站 110 kV 接地运行时,110 kV 侧发生接地故障后,在零序电流的影响下,110 kV 侧就地安装保护的启动元件均可能动作,因此对于接地系统需采用启动元件和方向元件来进行故障定位。

根据从负荷侧到电源侧的原则,逐级判别就地保护的启动元件状态和方向元件,如图 10 所示。

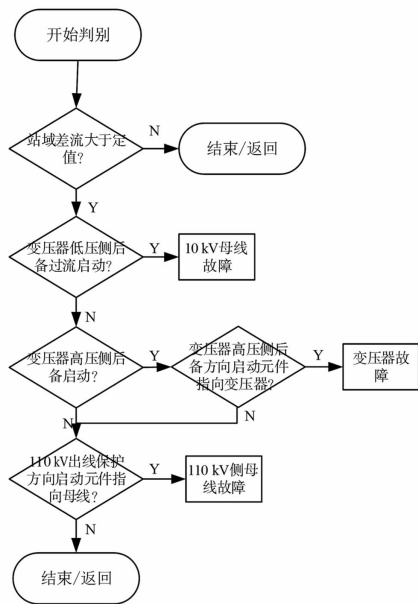


图 10 与就地保护协同的站域后备逻辑

站域后备保护在判别故障后,与就地主保护时间配合,同时也避免通信异常造成事故扩大,延时一个整定级差后切除相邻断路器或上级断路器。通过与就地保护的协同交互,降低了由于站域保护接收的采样数据异常而造成事故扩大,与就地保护形成梯级配合,实现变电站内故障的近后备。

4 结 论

通过对于现有继电保护功能配置,根据保护范围、整定原则、横向耦合性、决策信息量等方面,将就地保护中的部分后备保护、失灵保护等上移到站域保护或区域(广域)保护中,使就地保护形成以一次设备为对象、断路器为边界、无死区的独立自治系统,减少了就地保护的横向耦合,方便了实际工程运

维;并基于智能变电站 IEC 61850 良好的互操作性,提出了就地保护定值自动整定的解决思路。对于站域后备保护,提出与就地保护协同站域后备保护方案,形成变电站范围内故障的短延时后备保护,同时提高了站域后备保护的可靠性。

为进一步提高继电保护的可靠性,降低由于信息交互带来的风险,今后还需要加强以下几个方面的研究:1)网络通信的可靠性;2)设备信息描述的完善性;3)虚端子连接的方便性。

随着对智能变电站技术的进一步研究,利用智能变电站的信息共享优势,提高继电保护的选择性、灵敏性、速动性、可靠性也会具有更广阔的空间。

参考文献

- [1] 周孝信,鲁宗相,刘应梅,等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29): 4999-5008.
- [2] 李孟超,王允平,李献伟,等. 智能变电站及技术特点分析[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(18): 59-62.
- [3] 宋璇坤,李颖超,李军,等. 新一代智能变电站层次化保护系统[J]. 电力建设,2013,34(7): 24-29.
- [4] 李锋,谢俊,兰金波等. 智能变电站继电保护配置的展望和探讨[J]. 电力自动化设备,2012,32(2): 122-126.
- [5] 和敬涵,李倍,刘琳,等. 基于分布式功能的站域保护[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(6): 26-32.
- [6] 马静,史宇欣,马伟,等. 基于有限交叠多分区的站域后备保护方案[J]. 电力自动化设备,2015,35(1): 101-106.
- [7] 周泽昕,王兴国,杜丁香,等. 一种基于电流差动原理的变电站后备保护[J]. 电网技术,2013,37(4): 1113-1120.
- [8] 刘益青,高厚磊,李乃永,等. 适用于站域后备保护的智能变电站站间信息传输方案[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(2): 96-102.
- [9] IEC 61850-7-4:2003, Communication Networks and Systems in Substations Part 7-4: Basic Communication Structure for Substation and Feeder Equipment—Compatible Logical Node Classes and Data Classes[S].

作者简介:

- 张 尧(1984),工程师,主要研究方向为电力系统继电保护及智能变电站;
- 陈福锋(1979),高级工程师,主要研究方向为电力系统继电保护及智能变电站;
- 陈 实(1985),助理工程师,主要研究方向为电力系统继电保护及智能变电站。
- (收稿日期:2016-12-02)

西藏中部电网暂态电压稳定问题分析及 解决措施研究

郑 勇¹,张立峰²,晏小彬¹,何志强¹

(1. 西南电力设计院有限公司,四川 成都 610021;2. 国网西藏电力有限公司,西藏 拉萨 850000)

摘 要:西藏中部电网“十三五”期电力负荷增长迅猛,但电源建设滞后,冬季受电比例较高,暂态电压稳定问题较为突出。深入研究了西藏中部电网暂态电压稳定问题的机理和影响因素,分析表明感应电动机、直流换流站在电网暂态恢复过程中的无功需求会恶化受端系统的稳定性。综合分析本地的优势资源以及电网侧可采取的稳定措施,其中新建光热电站、调相机等措施均能有效地抑制中部电网电压失稳,提高中部电网的受电能力。

关键词:西藏中部电网;暂态电压稳定;感应电动机;调相机

Abstract: Power load of central Tibet power grid will be growing rapidly in 13th Five – Year period, but the power construction lags, the proportion of receiving power in winter will be higher, and the transient voltage stability problem is much more outstanding. The mechanism and influencing factors of transient voltage stability problem in central Tibet power grid are deeply studied. The analysis shows that the reactive power demand of induction motor and DC converter station will worsen the stability of the receiving system in the process of transient recovery. The advantages of local resources and the stability measures on grid side are comprehensively analyzed, wherein newly – built solar – thermal power generation stations and synchronous condenser can effectively restrain the voltage instability of central power grid and increase the power receiving capability of central power grid.

Key words: central Tibet power grid; transient voltage stability; induction motor; synchronous condenser

中图分类号:TM712 文献标志码:A 文章编号:1003 – 6954(2017)02 – 0071 – 04

0 引 言

目前,西藏电网由西藏中部电网、昌都电网和阿里电网共“一大两小”3 个电网组成。其中西藏中部电网覆盖西藏中部拉萨、日喀则、山南、那曲和林芝等地区,是西藏电网的主要负荷中心。目前西藏中部电网通过 1 回 ± 400 kV 直流线路与西北电网相连。2018 年左右将建成西藏中部电网与昌都电网联网工程及拉林铁路配套供电工程,实现西藏中部电网、昌都电网和四川电网的 500 kV 交流互联,形成西藏—四川同步电网。

西藏中部电网冬季电源出力较小,区外电力送入比例较大,规划藏中电网四川电网 2 回 550 kV 交流联网线路长约 1 400 km,通道缺乏电源支撑,自身动态无功支撑能力较差;加上主网架结构薄弱,“十三五”新增工业负荷占比又较大,受端电网内部 220 kV 线路三相短路故障后暂态电压稳定问题较为突出。

下面对 2018 年西藏中部电网经昌都电网与四川电网的交流联网通道建成后的冬大方式进行电压稳定分析,详细讨论西藏中部电网暂态电压失稳的影响因素,分析提高其稳定的措施,为电网规划、建设以及运行提供参考。

1 计算模型和工具

1) 负荷模型

负荷模型对电力系统的暂态稳定性具有复杂的影响^[1-5]。目前西藏电网调度部门均采用综合动态负荷模型,常规负荷感应电动机比例为 30%,工业负荷感应电动机比例为 70%。“十三五”期中部电网工业负荷所占总负荷比例将从 35% 提高到 50%,主要有巨龙铜矿(220 MW)和华泰龙铜矿(110 MW)专用变压器接入墨竹工卡 220 kV 变电站,雄村铜矿(86 MW)专用变压器间接接入多林 220 kV 变电站。为分析“十三五”期大型工业负荷对西藏中部电网的影

响,负荷类型选择两种比例的负荷:I类全网采用30%的感应电动机负荷和70%的静态负荷模型;Ⅱ类大型工业负荷采用70%的感应电动机负荷+30%的静态负荷,剩余负荷构成为30%的感应电动机模型和70%的静态负荷模型。其中静态负荷模型按照25%恒阻抗+55%恒电流+20%恒功率分配。

2) 动态无功补偿

动态无功补偿对系统电压稳定影响较大^[6],计算基础模型考虑已建或已批准的动态无功补偿设备,包括拉萨220 kV环网和藏中交流联网通道的SVC装置。

3) 直流模型

直流暂态过程中的无功需求远大于稳态运行^[7],直流模型采用青藏直流的实际控制参数,包括低压限流环节和换向失败模型。

4) 计算工具和指标

分析计算工具采用中国电科院开发的电力系统分析软件(BPA)。扰动切除后电压低于0.75 p.u.,持续超过50 Hz为电压失稳,扰动切除后电压持续不可逆转地下降至0.5 p.u.以下为电压崩溃^[8]。

2 暂态电压稳定主要影响因素

2.1 系统电压稳定分析

西藏中部电网2018年冬大方式分析结果表明I类负荷模型西藏中部电网单一故障不会引起电压稳定问题,Ⅱ类负荷模型墨竹至电源或换流站的线路单一故障会造成电网末端电压失稳或崩溃。表1中给出了藏中电网主要故障的分析结果。

表1 系统故障稳定计算结果

故 障	I类负荷	Ⅱ类负荷
直流单极闭锁	稳定	稳定
沃卡—林芝—芒康三相短路	稳定	稳定
沃卡—山南三相短路	稳定	失稳
墨竹—沃卡三相短路	稳定	崩溃
墨竹—多布三相短路	稳定	崩溃
墨竹—朗塘三相短路	稳定	崩溃
墨竹—曲哥三相短路	稳定	崩溃
山南—羊湖三相短路	稳定	失稳
乃琼—羊湖三相短路	稳定	失稳

青藏直流单极闭锁后原青藏直流输送潮流转移至藏中—四川交流联网通道,故障前交流联网通道

芒康—林芝段送电约400 MW,单极闭锁后联网通道承担转移功率240 MW,芒康、波密和雅中均配置了120 Mvar的SVC,系统无暂态电压跌落;此时芒康—沃卡500 kV交流联网通道以及藏中220 kV环网配置的SVC无功出力能够满足潮流转移所需的动态无功需求,两种负荷模型下系统均能保持稳定运行。

500 kV交流联网发生三相短路故障时,交流系统发生暂态电压跌落,故障点离负荷中心和换流站均相对较远,且林芝和山南500 kV下网点均有一定的电源支撑。故障切除后负荷中心和换流站电压迅速恢复至0.75 p.u.,电网储备的动态无功能够满足此时感应电动机负荷以及直流暂态恢复的无功需求,两种负荷模型下系统均能保持稳定运行。

区内220 kV电网发生三相短路故障,I类负荷模型的暂态电压稳定性较好;Ⅱ类负荷模型系统末端的日喀则电网电压失稳或崩溃。电压崩溃故障控制点位于墨竹工卡附近。交流联网通道落点以及主要电源支撑主要位于山南和林芝,负荷中心和换流站位于拉萨。墨竹工卡是山南和林芝至拉萨负荷中心220 kV送电通道的重要枢纽站,220 kV送电通道墨竹工卡侧三相短路造成最大范围的电压跌落。故障切除后系统电压约0.5~0.6 p.u.,SVC最大出力下降约70%,负荷和换流站暂态无功需求增大,系统电压恢复困难,末端电压崩溃。墨竹—沃卡三相短路故障后系统主要节点电压如图1所示。

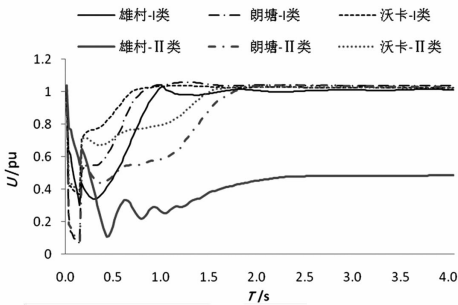


图1 节点电压曲线

2.2 主要影响因素

1) 感应电动机负荷

感应电动机负荷比例较高是中部电网电压失稳的主要原因,暂态扰动后感应电动机将经历机械和电磁相互耦合、相互作用的复杂动态过程。中部电网负荷中心电压恢复困难,末端的日喀则电网缺乏支撑。墨竹—沃卡三相短路后雄村和巨龙的无功负荷如图2所示,位于日喀则电网的雄村铜矿负荷无

功需求增大至扰动前的 3 倍,感应电动机转速将快速降低直至“堵转”。

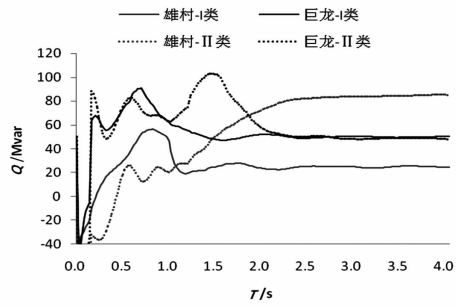


图 2 节点无功负荷曲线

2) 直流换流站暂态后无功需求

在稳态阶段时,直流系统吸收的无功功率由换流站滤波器组提供,与交流系统基本不发生无功交换;但在故障后暂态过程中,直流系统所消耗的无功功率远大于稳态运行,而滤波器组发出的无功功率与母线电压平方成正比。如当电压跌至 0.7 p. u. 时,静态无功补偿将降至 50%,直流系统将从交流系统吸入大量无功功率,恶化交流电网电压稳定特性。若交流系统强壮,可提供足够的动态无功支撑,则影响不大;但对藏中电网而言,系统规模较小,如图 3 所示,墨竹一沃卡三相短路后暂态恢复期间换流站从电网吸收的无功最高达到 135 Mvar,青藏直流系统的无功电压特性对西藏中部电网暂态电压稳定性有重要影响。

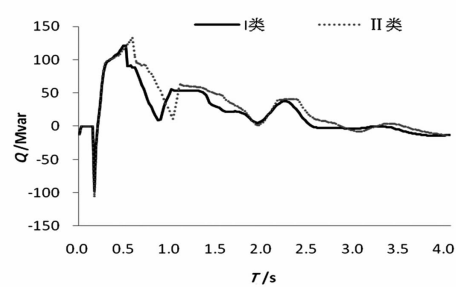


图 3 换流站从电网吸收的无功功率

综上所述,网内 220 kV 电网三相短路故障系统暂态电压跌落,网内电源支撑较弱,SVC 出力受限,感应电动机负荷诱发系统电压失稳;此外直流功率恢复需要吸收大量的无功,进一步恶化了系统电压稳定性。

3 解决措施研究

3.1 措施可实施性分析

采用 II 类负荷模型时西藏中部电网存在暂态电

压失稳,主要原因是感应电动机负荷所占比例较大、直流换流站暂态后无功需求增大、网内特别是电网末端电源支撑较弱缺乏足够的动态无功支撑。为提高电网枯期暂态电压稳定性,可选择的措施主要有 3 类:1) 增加电源;2) 增加调相机;3) 装设 SVC 或 SVG 等动态无功补偿装置。

1) 增加电源

西藏水能、地热、太阳能和风能等可再生资源十分丰富,化石能源缺乏。区内规划电源主要有水电、光伏、光热、风电以及燃气机组,其中水电、地热、光热和燃机可以有效增强枯期电源支撑。但是地热资源远离负荷中心,建设工期长,目前只能小规模开发;水电站建设工期长,建设难度相对较大,规划电源提前建成难度较大。故“十三五”期增加电源方案可用的解决措施如下:

① 光热电站

光热电站类似于常规火电站具有出力平稳、可参与调峰、有效改善电源结构、建设周期相对较短等优点,根据《十三五西藏太阳能热发电规划》,西藏中部的日喀则、山南和拉萨等地区均具备建设大规模光热电站的条件。可在末端的日喀则电网建设 200 MW 光伏电站接入多林或羊湖 220 kV 变电站。

② 燃气电站

规划“十三五”期建设格拉输气管道,届时在燃料供应充裕时可将拉萨 1 号燃油机组改为燃气机组,同时建设 2 号燃气机组。2 台燃机均通过燃乃线接入乃琼 220 kV 变电站。

③ 电源多开机

西藏中部电网电源以水电为主,电源多开机有 2 种方式:一是部分水电机组调相运行^[9],目前羊湖电厂具备调相机运行的条件;二是水电机组采用低负荷方式,西藏大部分水电机组避开振动区的稳定出力范围在额定出力的 45% ~ 100%^[10]。在旁多和藏木等主力水电站能够适应调相机运行或者机组低负荷运行情况下,水电多开机组约 250 MW。

2) 调相机

同步调相机在 1 ~ 2 s 内无功出力可达到其额定容量的 2 倍以上,为系统提供无功电压支撑,提高电压稳定性。朗塘换流站外具备扩建同步调相机的条件,考虑在换流站扩建 2 台 100 Mvar 调相机。

3) SVC

除新建电源、调相机或电源多开机等方案外,可

采用 SVC 等快速响应的 FACTS 设备提高受端电网的动态无功支撑能力。朗塘换流站具备站外扩建 SVC 的条件,考虑在朗塘建设 200 Mvar 的 SVC。

3.2 措施效果比较

针对Ⅱ类负荷模型分别采用上述措施后,西藏中部电网末端电压曲线如图4所示,结果表明上述措施均能有效提高西藏中部电网的暂态电压稳定性。

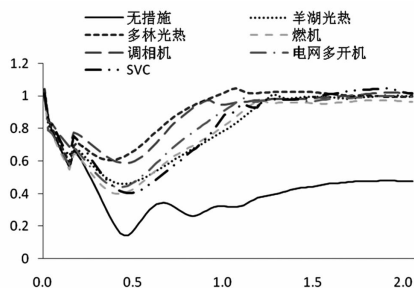


图4 电网末端电压曲线

对于增加电源类方案,电网末端建设光热电站接入多林 220 kV 变电站的系统暂态电压稳定性明显优于羊湖和乃琼 220 kV 变电站接入新增电源或电源多开机方案,西藏中部电网电源建设于电网末端更有利于提高系统暂态电压稳定性。

对于上述3类方案,由于调相机 1~2 s 内无功出力可达到其额定容量的2倍以上,SVC 或 SVG 无功出力和电压的平方成正比,受参数等多方面因素的限制发电机无功出力比调相机小。在3类方案接入点和规模基本相当时,调相机方案的系统暂态电压稳定性明显优于其余方案。

4 结论和建议

通过对西藏中部电网 2018 年冬大运行方式暂态电压稳定分析,结果表明:

1) 中部电网网内 220 kV 电网三相短路故障后,由于网内电源支撑较弱,感应电动机负荷比例较大以及直流功率恢复需要吸收大量的无功导致系统电压失稳。

2) 结合西藏资源条件,“十三五”期建设光热、燃机、调相机、SVC 以及电源多开机等措施均可增强西藏中部电网动态无功支撑,有效提高暂态电压稳定性。西藏中部电网电源建设于电网末端的日喀则电网更有利于提高系统暂态电压稳定性,同等规模

下调相机方案的电源支撑和电压稳定性优于增加电源方案和 SVC 方案。

3) 建议“十三五”期在换流站建设一定容量的调相机,应鼓励建设一定规模的光热电站,新建发电机组应具备低负荷运行能力;调度安排运行方式时应尽量降低单台机组出力,增大中部电网开机容量。新增工业负荷应尽可能降低感应电动机的使用比例。

参考文献

- [1] 西藏地区大中型矿业负荷特性对联网通道稳定性的影响研究[R]. 北京:中国电力科学研究院,2015.
- [2] 孙华东,周孝信,李若梅. 感应电动机负荷参数对电力系统暂态电压稳定性的影响[J]. 电网技术,2005,29(23):1-6.
- [3] 曹路,励刚,武寒. 马达负荷模型对华东电网暂态稳定性的影响分析[J]. 电网技术,2007,31(5):6-10.
- [4] 应林志,王建全. 负荷模型对特高压接入浙江电网暂态稳定分析的影响[J]. 华东电力,2011,39(1):121-124.
- [5] 赵贺,周孝信. 受端系统负荷对高压直流输电的影响[J]. 中国电机工程学报,2007,27(16):1-6.
- [6] 孙元章,王志芳,卢强. 静止无功补偿器对电压稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报,1997,17(6):373-376.
- [7] 李兴源. 高压直流输电系统[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [8] 廖民传,蔡广林,张勇军. 交直流混合系统受端电网暂态电压稳定分析[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(10):1-4.
- [9] 周德贵. 发电机组作调相机运行的分析与实践[J]. 四川电力技术,2001,24(3):1-6.
- [10] GB/T 15468-2006,水轮机基本技术条件[S]. 北京:中国国家标准化管理委员会,2006.

作者简介:

郑勇(1975),硕士、高级工程师,从事电力系统规划设计工作;

张立峰(1978),硕士、高级工程师,研究方向为电网技术与控制;

晏小彬(1987),硕士、工程师,从事电力系统规划设计工作;

何志强(1979),硕士、高级工程师,从事电力系统规划设计工作。

(收稿日期:2016-10-18)

220 kV 彩虹智能变电站过程层组网分析

艾 飞¹,黄继荣¹,胡冬良¹,张 振²,林 楠¹

(1. 国网杭州供电公司,浙江 杭州 310009;2. 国网宜昌供电公司,湖北 宜昌 443000)

摘 要:智能变电站技术仍处于发展阶段,但它是变电站建设的必然趋势。目前,中国智能变电站数量较少,实际运行管理经验较常规变电站欠缺。由于智能变电站自身的特点,给运行值班人员的学习理解带来一定困难。过程层网络是智能变电站的重要基础,直接关系到全站数据采集和开关控制的可靠性和实时性。以新建 220 kV 彩虹智能变电站为例,介绍了智能变电站保护、测控、智能组件配置,分析了各典型间隔保护、测控、智能组件之间的网络连接及信息传递。对彩虹智能变电站的网络剖析可以给运行值班人员对智能变电站设备的运行操作提供一定参考。

关键词:智能变电站;合并单元;智能终端;GOOSE;SV

Abstract:The study of smart substation is in progress, but it is an inevitable trend to the further development of substation constructions. The quantity of smart substations is still low at present in China, and it is lack of the experiences in operation and management of smart substations, so operators also face many challenges in study and understanding. Process layer networking is an important base of smart substation. The composition, information transmission and network connections of process layer networking are introduced taking 220 kV Caihong smart substation for example. Network analysis of this smart substation provides a reference for operation and manipulation of smart substation.

Key words:smart substation; merging unit; smart terminal; GOOSE; SV

中图分类号:TN915 文献标志码:B 文章编号:1003-6954(2017)02-0075-04

0 引 言

智能变电站是变电站自动化技术发展的延伸。它采用先进、可靠、集成、低碳、环保的智能设备,以全站信息数字化、通信平台网络化、信息共享标准化为基本要求,自动完成信息采集、测量、控制、保护、计量和监测等基本功能;并可根据需要支持电网实时自动控制、智能调节、在线分析决策、协同互动等高级功能的变电站^[1],其主要特征是一次设备智能化,二次设备网络化。智能站与常规站主要有以下区别^[2]:

- 1)减少了大量硬接线,所有的开入、模拟量等信息采集均在就地完成,转换为数字量后通过标准规约从网络传输。
- 2)所有的开出控制通过网络通信完成。
- 3)继电保护的采样、出口以及控制等功能均由网络通信报文完成,取消了传统的二次继电器逻辑接线。
- 4)数据的共享通过网络交换完成。

具体来讲,智能变电站用光缆(网线)取代了电缆,数字信号代替了模拟信号,大大提高了采样精度和信号传输的可靠性;大幅度简化了二次接线,避免了传统互感器和电缆连接的固有问题;设备之间的互操作性更强,相当程度地提高了变电站的自动化水平。因此,分析清楚智能变电站的网络结构,尤其是过程层网络和信息传输对于智能变的运行管理极为重要。

1 彩虹变电站概况

彩虹智能变电站工程位于杭州市滨江区,目前工程规模如下:主变压器 2×240 MVA;220 kV 系统采用户内 GIS,双母接线,设专用母联,出线 4 回;110 kV 采用户内 GIS,单母分段接线,设专用母分,出线 6 回;35 kV 采用常规户内开关柜设备,出线 5 回。主变压器配置 2 套电气量保护和 1 套非电量保护。220 kV 母线配置 2 套母差保护,220 kV 线路配置 2 套线路保护,220 kV 母联配置 2 套母联保护。110 kV 母线配置 1 套母差保护,110 kV 线路配置 1

套线路保护,110 kV 母分配置 1 套母分保护,110 kV 侧还配置 1 套备自投。35 kV 线路和母分配置 1 套保测一体化装置,均置于各自开关柜二次仓门上。

随着光纤通讯技术、网络技术的快速发展及其在变电站自动化系统中的深入应用,用数字通讯手段“传递”电量信号,用光纤作为传输介质取代传统的金属电缆构成网络通讯的二次系统是智能变电站的必然选择^[3]。因此,通讯传输网在智能变电站中地位重要,是变电站的“神经”。为此,本站中网络交换机工作电源均采用双电源配置,确保站中信息传输的可靠性。彩虹变电站开关设备与互感器均为传统设备,互感器输出模拟量通过电缆接入相应合并单元,并在合并单元内进行模数转换,避免了传统接线中电压互感器短路、电流互感器开路的问题,提高了数据精度。SV 连接和 GOOSE 连接采用光纤设备,按照 IEC 61850 的规范进行通信。设备间的连接除合并单元只有输出外(采用一股光纤),其他均为输入输出(采用两股光纤)。

彩虹变电站采用了“三层两网”的网络结构。站控层设备主要有监控主机、远动通讯装置、对时系统等,实现对全站设备的监视、控制、告警及信息交互功能,完成数据采集与监控,操作闭锁及同步相量采集、电能量采集、保护信息管理等相关功能。间隔层设备按断路器间隔划分,主要有保护装置、保测一体化装置、测控装置,实现使用一个间隔的数据并且作用于该间隔一次设备的功能。过程层是一次设备与二次设备的结合面,即智能化电气设备的智能化部分。其主要功能为运行电气量检测、运行设备状态检测、操作控制命令执行^[4]。过程层设备主要有合并单元和智能终端,合并单元主要用来接收本间隔或多个间隔电流互感器、电压互感器输出的模拟量,并在装置内部进行模数转换,以 IEC 61850 的帧结构将电流、电压信号合并处理后通过 SV 光信号传给保护、测控等间隔层设备。智能终端用来获取刀闸和断路器的位置信号等信息,并通过 GOOSE 规约上传给间隔层设备,同时接受保护的跳闸命令或测控的控制命令,来驱动断路器或刀闸,类似操作箱的功能,作为智能开关设备尚未出现情况下的一种过渡设备^[5]。“两网”指 MMS 网和 GOOSE 网。站控层设备间以及站控层与间隔层设备间通讯使用 MMS 规约通讯,使出自不同制造商的设备之间具有互操作性^[6]。过程层与间隔层设备通讯使用

GOOSE 通讯规约,主要包括传输跳合闸信号,具有高传输成功率^[7]。

2 GOOSE 及 SV 信号传输

智能变电站过程层网络通信主要涉及合并单元和智能终端的使用,对全站的安全稳定运行起极其重要的作用^[8]。目前智能变电站过程层的组网方式主要有^[9]:1)SV 直连和 GOOSE 直连;2)SV 组网和 GOOSE 直连;3)SV 直连和 GOOSE 组网;4)SV 组网和 GOOSE 组网;5)混合组网。彩虹变电站主要考虑保护装置安全可靠性的要求,尽量避免因网络故障导致保护功能失效,采用了混合组网方式:保护采样和跳闸点对点,其余通过组网方式实现。因此,这些合并单元和智能终端都有多个光纤接口以满足直连和组网的需求。

2.1 主变压器配置

主变压器配置 2 套电气量保护(A 套、B 套)和 1 套非电量保护,每套电气量保护包含完整的主、后备保护功能。主变压器各侧配置合并单元 2 套,智能终端 2 套。220 kV 侧和 110 kV 侧智能终端与合并单元各设于同一智能组件柜中并就地放置于一次设备现场。35 kV 侧 2 套智能终端与合并单元设于相应母线母设柜二次仓上。主变压器每侧配置 1 套测控装置,本体单设 1 套测控装置。

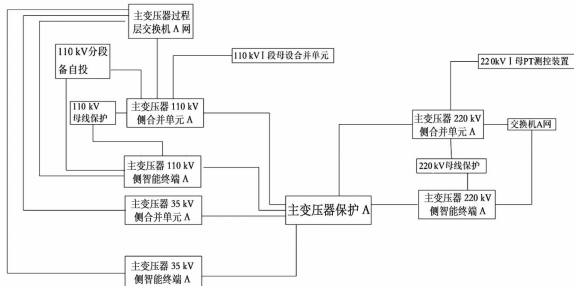


图 1 主变压器 A 套保护相关信息流向



图 2 主变压器 B 套保护相关信号流向

合并单元的信息是单向传输的,本站主变压器各侧合并单元采集电压、电流信号并直接通过光纤送给电量保护,保护动作后直接传跳闸信号给各侧智能终端跳开各侧断路器,即“直采直跳”。

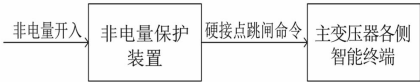


图 3 主变压器非电量保护相关信号流向

主变压器本体合并单元 2 套与非电量保护设于同一柜并置于主变压器现场。该非电量保护与主变压器本体智能终端功能合并于同一装置。

如图 3 所示,本站非电量保护采用就地直接电缆跳闸,本体智能终端接受非电量保护动作报文,而且能采集主变压器中性点接地刀闸分合状态、主变压器调档信息及中性点接地刀闸控制信息。

2.2 220 kV 线路配置

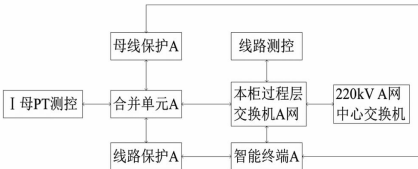


图 4 220 kV 线路保护 A 套相关信息流向

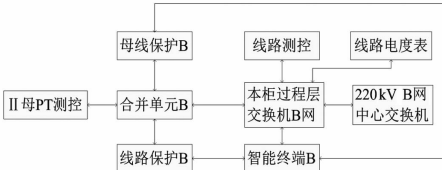


图 5 220 kV 线路保护 B 套相关信息流向

220 kV 线路保护 2 套(A 套、B 套)分别设于 2 个屏柜,包含主、后备功能,配置 2 套独立的合并单元、智能终端,各智能终端分别控制 1 个跳闸线圈。智能终端间通过网络连接实现 2 套重合闸之间的配合。

220 kV 线路保护采用线路三相电压电流实现保护功能,由线路间隔合并单元提供。母线电压用于同期功能,由母线间隔合并单元送入线路间隔合并单元,并在线路间隔合并单元实现电压切换。线路保护动作后,经 GOOSE 光纤直接传送跳合闸信号、重合闸信号至智能终端。同时智能终端也向线路保护传送断路器位置、压力低闭锁重合闸、智能终端闭锁重合闸等信号。

2.3 220 kV 母线配置

220 kV 母线保护 2 套(A 套、B 套)分别设于 2 个屏柜。母线保护包括母差保护、开关失灵保护功

能,母线上各间隔合并单元单向向母差保护提供电流采样值,母差保护所需的电压由各段母线母设合并单元提供。保护动作后直接开入相应的智能终端,实现“直跳”。各间隔智能终端向母差保护提供母线刀闸位置、断路器位置信号,母差保护向线路智能终端传送闭锁重合闸及三跳信号,线路开关或主变压器开关失灵信号通过各网中心交换机 GOOSE 网络传送给母差保护,即“网跳”。

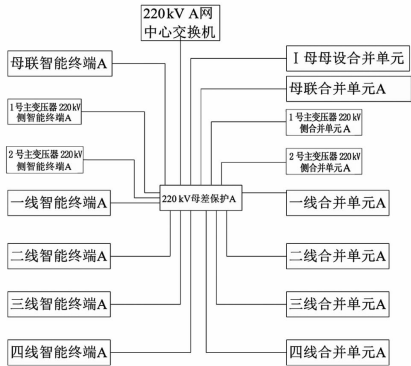


图 6 220 kV 母线保护 A 套相关信息流向

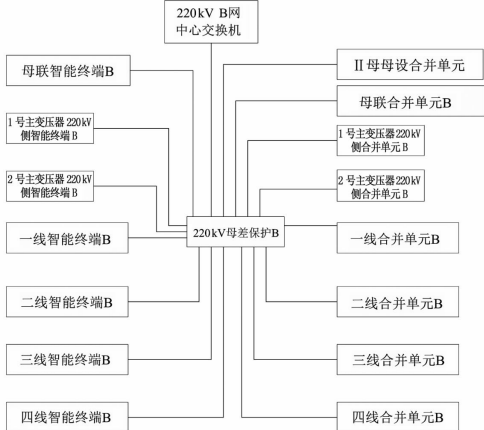


图 7 220 kV 母线保护 B 套相关信息流向

2.4 220 kV 母联配置

220 kV 母联保护 2 套(A 套、B 套)分别设于 2 个屏柜。母联测控 1 套。母联合并单元单向向母联保护和母差保护提供所需电流,母联保护或母差保护动作后开入母联智能终端,“直跳”母联开关。母联智能终端向母差保护提供母线刀闸位置、断路器位置信号。母联失灵或死区故障时启动母差的相关

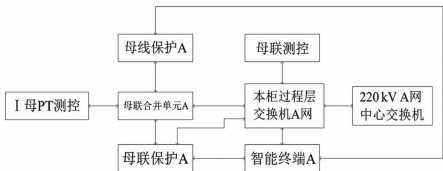


图 8 220 kV 母联保护 A 套相关信息流向

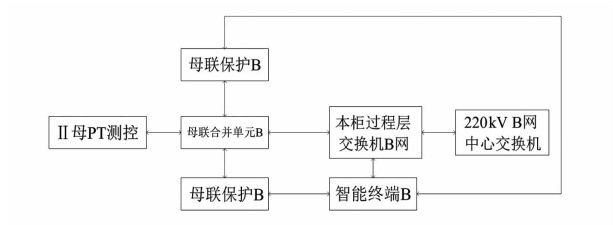


图9 220 kV 母联保护 B 套相关信号流向
信息通过 GOOSE 网络传送。

2.5 110 kV 线路配置

110 kV 线路保护测控一体化 1 套,单设于一屏柜,原理及信息流向同 220 kV 线路。

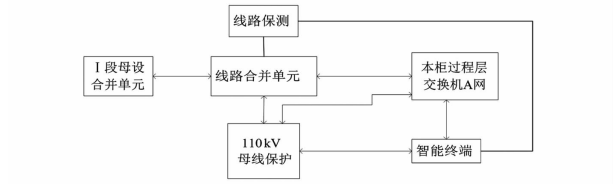


图10 110 kV 线路保护相关信息流向

2.6 110 kV 母线保护配置

110 kV 母线保护 1 套,单设一屏柜,原理及信息流向同 220 kV 母线。

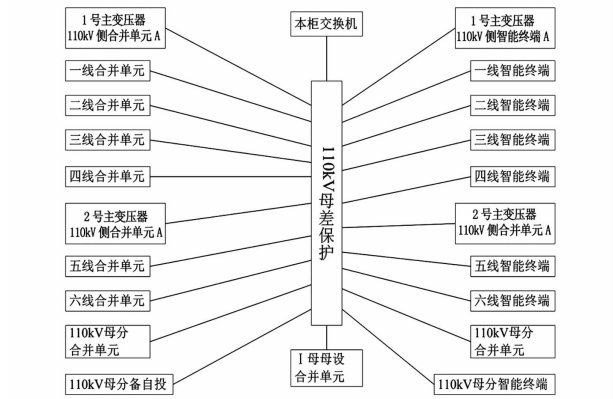


图11 110 kV 母线保护 B 套相关信息流向

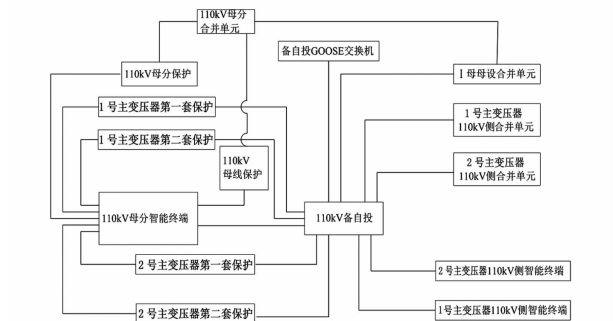


图12 110 kV 母分及备自投相关信息流向

2.7 110 kV 母分及备自投配置

110 kV 母分保护测控一体化设备 1 套,设于一屏柜。母分合并单元向母分保护提供电流信息,向母差保护提供电流、电压信息。母分保护或母差保

护动作后“直跳”母分开关。1 号、2 号主变压器电量保护直接传送闭锁信号到备自投装置,备自投从 1 号、2 号主变压器 110 kV 侧合并单元取得所需电流、电压量,并根据运行方式传送跳合闸信号到相应智能终端。

3 结 语

按照国家电网公司规划,智能变电站已全面开展建设。过程层组网方案及过程层信息传送对智能变电站的安全稳定运行起决定性作用。以彩虹智能变电站为例,介绍了智能站的特点,智能站的保护测控、合并单元、智能终端配置设置,然后按各典型间隔详细分析了过程层设备与间隔层设备之间的光纤连接和信息传送,具有较强的实践性,对于变电运行值班人员的运行操作和学习理解有一定的指导意义。

参考文献

[1] Q/GDW 441 - 2010, 智能变电站继电保护技术规范[S]. 北京:中国电力出版社,2010.

[2] 武登编写组. 智能变电站 1000 问[M]. 北京:中国电力出版社,2014.

[3] 国家电力调度控制中心,国网浙江省电力公司. 智能变电站继电保护技术问答[M]. 北京:中国电力出版社,2014.

[4] Q/GDW 383 - 2009, 智能变电站技术导则[S]. 北京:中国电力出版社,2009.

[5] 冯军. 智能变电站原理及测试技术[M]. 北京:中国电力出版社,2011.

[6] 黄新波. 智能变电站原理与应用[M]. 北京:中国电力出版社,2013.

[7] 邱智勇,陈健民,朱炳铨. 基于 IEC 61850 的 500 kV 三层结构数字化变电站建设[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(12): 103 - 107.

[8] 苏麟,孙纯军,褚农. 智能变电站过程层网络构建方案研究[J]. 电力系统通信, 2010, 31(7): 10 - 13.

[9] 赵永生,桑仲庆,刘海峰,等. 曾家冲智能变电站自动化系统关键技术和问题分析[J]. 湖南电力, 2011, 31(5): 4 - 7.

作者简介:

艾 飞(1983), 硕士、工程师, 主要从事变电运维工作;
黄继荣(1965), 高级技师, 主要从事变电运维工作;
胡冬良(1982), 硕士、工程师, 主要从事变电运维工作;
张 振(1982), 硕士、工程师, 从事继电保护整定工作。

(收稿日期: 2016 - 11 - 08)

甘肃河西电网小干扰分析

姚 巽, 宋建光

(国网甘肃省电力公司调度控制中心, 甘肃 兰州 730030)

摘 要:介绍了甘肃河西电网低频振荡的产生原因和抑制办法,阐述了配置电力系统稳定器所带来的优势,对河西电网在几种不同的电力系统稳定器配置方式下进行了小干扰分析,研究了其系统振荡模式和模态,对甘肃河西电网的振荡分析及控制策略研究有一定指导作用。

关键词:甘肃河西电网;低频振荡;小干扰分析

Abstract:The causes and suppression methods of low frequency oscillation in Gansu Hexi power grid are introduced, and the advantages brought by power system stabilizer are described. Small – signal analysis is carried out for the different power system stabilizer configuration in Hexi power grid. The oscillation modes of the system are studied, and the research plays some guiding roles to low frequency oscillation and its control strategy of Gansu Hexi power grid.

Key words:Gansu Hexi power grid; low frequency oscillation; small – signal analysis

中图分类号:TM711 文献标志码:A 文章编号:1003 – 6954(2017)02 – 0079 – 05

0 引 言

甘肃电网处于西北电网的中部,是西北电网的主要组成部分,目前主网电压等级为 750 kV、330 kV^[1]。目前,甘肃电网总装机量约为 30 000 MW,地区负荷约为 15 000 MW,外送需求迫切。尤其是河西地区,此处有大量光伏接入,而这些地区负荷不大无法就地消纳,使得新能源外送需求迫切^[2]。但此处的低频振荡问题由来已久,自 2008 年 11 月至 2009 年 6 月,甘肃河西电网 330 kV 输电线上,酒泉、嘉峪关、张掖、山丹、金昌、凉州、古浪、海石湾站多次监测到振荡频率为 0.6 Hz 左右,最大峰谷值达 135 MW,持续最长时间为 80 s 的低频振荡现象。酒钢第三热电厂 2 号机(酒钢第三热电厂共有 2 台 300 MW 机组)于 2008 年元月投运,而后河西电网 330 kV 输电线路表现出不稳定状态^[3-4]。

文献[5]采用对降阶简化系统的方法,证明了规划中大区联网系统的小干扰稳定分析具备可行性;文献[6]采用追踪联网成功研究了山东电网低频振荡问题;文献[7]中保持网架结构、系统潮流和发电机总数不变,求出了与四川电网相关的系统主导低频振荡模式。下面介绍了低频振荡的产生和抑制问题,阐述了配置电力系统稳定器所带来的优势,

对河西电网在几种不同的 PSS 配置方式下进行小干扰分析,研究了其系统振荡模式和模态,对甘肃河西电网的振荡分析及控制策略研究有一定指导作用。

1 低频振荡的产生和抑制

低频功率振荡主要发生在经长距离、重负荷、弱联系的区域之间,主要表现为区域间一个发电机群对另一个发电机群的弱阻尼或负阻尼振荡问题。

系统发生低频功率振荡可能的原因和现象如下:

- 1)系统弱阻尼时,系统受到扰动后功率发生振荡且长时间才能平息;
- 2)系统负阻尼时,系统发生自激振荡。这种振荡幅度逐渐增大,造成系统失步,或由于控制系统的饱和成为等幅振荡,长时间不能平息;
- 3)系统振荡模的固有振荡频率与某种功率波动的频率相同而引起强迫振荡,这种振荡随功率波动源的消除而消除;
- 4)发电机转速变化引起的电磁力矩变化与电气回路耦合产生的机电振荡。

发生低频功率振荡可能会引起联络线过流跳闸或造成系统与系统、机组与系统之间的失步而解列,严重威胁电网的安全运行。

影响电力系统阻尼的因素,主要有参与互联的各区域电网的结构和潮流方式、自动电压调节器及各种自动控制装置、电网互联的强弱和联络线输送的潮流、方向及负荷特性等参数。目前,提高电力系统阻尼和稳定性最经济、最有效的措施仍然是在相关机组上配置电力系统稳定器,即 PSS (power system stabilizer)。同时,应研究充分利用已有的各种控制装置的作用,例如直流调制、可控串补和静补等。

2 配置电力系统稳定器的优势

配置电力系统稳定器可以从源头上消除产生负阻尼的根源。自动电压调节器是发电机励磁控制系统的最重要组成部分,对提高电力系统的静态稳定水平和暂态稳定水平有重要的作用。但是,一定条件下它也是互联系统中“地区振荡模式”和“区域间振荡模式”产生负阻尼的最重要的根源。如果在产生负阻尼的发电机的励磁控制系统中配上电力系统稳定器,并合理选择其参数,使 PSS 提供的正阻尼等于或大于电压调节器产生的负阻尼,这样就从源头上消除了电力系统中产生负阻尼的根源。

电力系统稳定器使用效率很高。电力系统稳定器、自动电压调节器都是励磁控制系统的一个组成部分,它们有相同的可使用率和可靠性。尤其是在使用微机型励磁调节器的情况下,电力系统稳定器的功能是由软件实现的,可以做到发电机的电压调节器在投入运行时,电力系统稳定器也同时投入运行状态。这样的同步关系在电力系统运行方式发生改变时也不会改变。

电力系统稳定器的参数有良好的适应性。在进行电力系统稳定器的参数整定时,要根据所在

电网的特点以及配置电力系统稳定器的发电机励磁控制系统调节特性,确定电力系统稳定器运行的合理参数及其应当满足的频率范围。这样就能保证电力系统稳定器有很好的适应性,在各种可能出现的运行方式下,每一台发电机组的电力系统稳定器对于与该发电机有强相关的各个振荡模式都能提供正阻尼。

广泛的配置 PSS 可以适应系统运行方式的变化。特别是对那些联络线模式,与它相关的机组可能有多个,从全局协调控制的角度出发,是将所需的阻尼分配给所有有作用的机组共同承担,并不是只依靠一台机(虽然在对于许多地区振荡模式,一台强相关的机组有可能提供足够的阻尼),这样当那台机停运,不致失去对该模式全部阻尼,或当部分网解列成为独立电网运行方式出现时,这个独立电网因没有电力系统稳定器或电力系统稳定器太少而引起振荡。这是一种基于备用或分担风险的策略。

3 河西电网主力机组小干扰分析

3.1 计算条件

根据甘肃电网特点及发生低频振荡时的电网运行方式,选择甘肃电网 2009 年典型方式进行分析,西北电网及分区发电量摘要如表 1 所示。

对全网进行了低频振荡分析,主要是针对振荡频率 0.1 ~ 2.5 Hz 范围内的特征根进行扫描。振荡模式强弱的判定条件是:阻尼比 $\xi \geq 0.05$ 时称为强阻尼, $0.05 > \xi \geq 0.03$ 时称为中等阻尼, $0.03 > \xi > 0$ 时统称为弱阻尼($0.01 > \xi > 0$ 时称为极弱阻尼), $\xi = 0$ 时称为零阻尼或临界阻尼, $\xi < 0$ 时称为负阻尼。

3.2 河西电网主力机组均不配置 PSS 时小干扰分析

河西主力机组全部退出 PSS 情况下进行小干扰

表 1 甘肃 2009 年典型方式下西北电网及分区发电量

区域名	总有功发电 /MW	总无功发电 /Mvar	总有功负荷 /MW	总无功负荷 /Mvar	总有功损耗 /MW	总无功损耗 /Mvar
华中	0	0	360.000	71.724	4.080	-164.865
陕西	6 343.02	1 255.965	6 930.000	3 089.766	70.655	-1 748.688
甘肃	6 101.30	1 357.145	5 483.217	2 027.129	131.321	-722.766
青海	4 760.50	1 554.067	4 078.910	1 900.320	63.198	-390.266
宁夏	5 323.00	1 191.332	5 397.826	2 266.728	38.337	-592.940
全网	22 527.82	5 358.509	22 249.953	9 355.667	307.591	-3 619.525

表 2 河西电网主力机组均不配置 PSS 时河西 – 系统振荡模式特征值

实部	虚部	频率/Hz	衰减阻尼比/%	机电回路相关比
-0.009 498	3.686 532	0.586 730	0.257 6	3.850 55

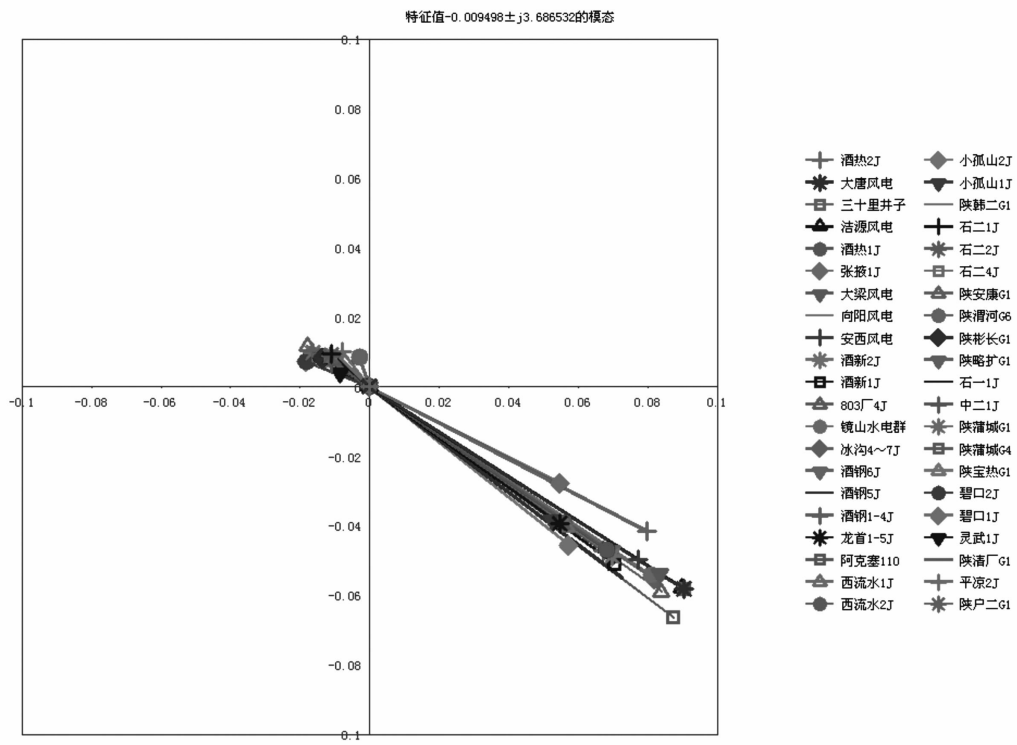


图 1 河西电网主力机组均不配置 PSS 时河西 – 系统振荡模式模式图

表 3 对酒钢自备电厂大机组配置 PSS

编号	母线编号	机组功率 /MW	励磁参数		PSS 参数	
			模型编号	参数组号	模型编号	参数组号
1	酒钢 1 ~ 4J	72	1	2	无	无
2	酒钢 5J	50	12	903	无	无
3	酒钢 6J	50	12	903	无	无
4	酒新 1J	135	12	902	2	903
5	酒新 2J	135	12	902	2	903
6	酒热 1J	300	12	51	4	80
7	酒热 2J	300	12	51	4	81

分析,发现河西走廊机群对系统间存在明显的振荡模式,振荡频率为 0.59 Hz,阻尼比为 0.257 6%,属于极弱阻尼情况,并且与 PMU 装置监测到的河西电网低频振荡频率相符。

该振荡模式与酒钢内部 3 个自备电厂、酒泉地区大量风电场、张掖电厂及一些小水电厂密切相关,具体情况见表 2 和图 1。

3.3 河西电网主力机组按实际情况配置 PSS 后小干扰分析

根据 2009 年典型数据,河西电网主力机组中实

际上只有金川 2 号机配置了 PSS,对此进行小干扰分析的结果与 3.2 节几乎完全相同,不再赘述。

3.4 酒钢内部大机组配置 PSS 后小干扰分析

对酒钢内部大机组配置 PSS,如表 3 所示。

按表 3 配置酒钢内部大机组 PSS 后,重新进行小干扰分析,结果表明河西电网内部仍存在该典型振荡模式,振荡频率仍为 0.59 Hz,但是阻尼比由原来的 0.257 6% 提高到 3.011 9%,由极弱阻尼振荡变为中等阻尼振荡,说明酒钢的自备电厂确实对该振荡模式起到了主导作用,对其 PSS 进行整定和投

表 4 酒钢内部大机组配置 PSS 后河西 – 系统振荡模式特征值

实部	虚部	频率/Hz	衰减阻尼比/%	机电回路相关比
-0.111 702	3.706 984	0.589 985	3.011 9	2.415 00

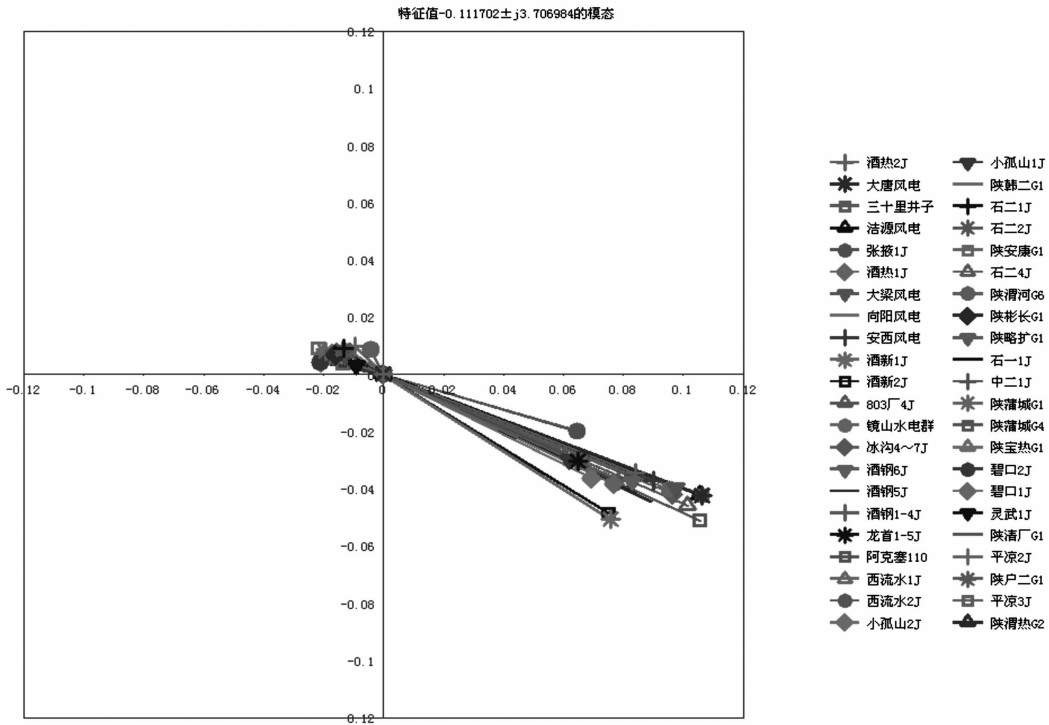


图 2 酒钢内部大机组配置 PSS 后河西 – 系统振荡模式模式图

表 5 河西电网全部主力机组配置 PSS 后河西 – 系统振荡模式特征值

实部	虚部	频率/Hz	衰减阻尼比/%	机电回路相关比
-0.192 001	3.723 510	0.592 615	5.149 6	1.878 17

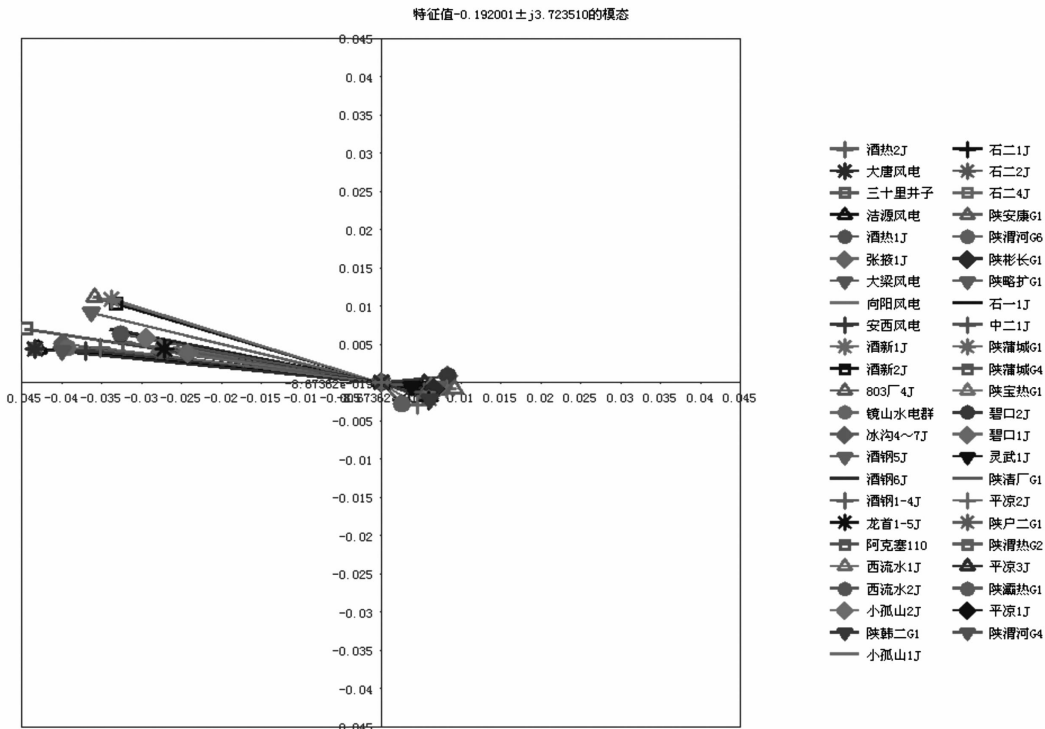


图 3 河西电网全部主力机组配置 PSS 后河西 – 系统振荡模式模式图

表 6 河西电网低频振荡小干扰分析结果

河西电网配置 PSS 情况	实部	虚部	频率/Hz	衰减阻尼比/%	机电回路相关比
均不配置	-0.009 498	3.686 532	0.586 730	0.257 6	3.850 55
实际情况配置	-0.009 498	3.686 532	0.586 730	0.257 6	3.850 55
酒钢大机组全部配置	-0.111 702	3.706 984	0.589 985	3.011 9	2.415 00
河西主力机组全部配置	-0.192 001	3.723 510	0.592 615	5.149 6	1.878 17

运,能够很大程度上提高系统阻尼,有利于抑制河西电网低频振荡的发生。有关该振荡模式的详细信息如表 4 和图 2 所示。

3.5 河西电网全部主力机组配置 PSS 后小干扰分析

对河西电网全部主力机组配置 PSS 后,在原潮流情况下重新进行小干扰分析,结果表明河西电网与系统间存在一个强阻尼振荡模式,振荡频率仍为 0.59 Hz,但是阻尼比已经提高到 5.149 6%,由最初的极弱阻尼振荡变为强阻尼振荡,说明对河西电网全部主力机组配置并投运 PSS,能够更有效地提高系统阻尼,可以显著抑制河西电网低频振荡的发生。有关该振荡模式的详细信息如表 5 和图 3 所示。

4 小 结

各次小干扰分析结果汇总如表 6 所示。

根据前面计算分析可以得到如下结论:

1)河西电网主力机组均不配置 PSS 或按照甘肃 2009 年典型方式配置 PSS,河西机群对系统间存在明显的振荡模式,振荡频率为 0.59 Hz,阻尼比为 0.257 6%,属于极弱阻尼情况,并且与 PMU 装置监测到的河西电网低频振荡频率相符。

2)酒钢的自备电厂对该振荡模式起到了主导作用,对其大机组 PSS 进行整定和投入,能够在很大程度上提高系统阻尼,有利于抑制河西电网低频振荡的发生。酒钢大机组 PSS 投入后,河西机组对系统间振荡频率仍为 0.59 Hz,但是阻尼比由原来的 0.257 6% 提高到 3.011 9%,由极弱阻尼振荡变为中等阻尼振荡。

3)对河西电网全部主力机组配置并投入 PSS,

能够更有效地提高系统阻尼,可以显著抑制河西电网低频振荡的发生。河西电网全部主力机组投入 PSS 后,河西机群与系统间存在一个强阻尼振荡模式,振荡频率仍为 0.59 Hz,但是阻尼比已经大幅提高到 5.149 6%,由最初的极弱阻尼振荡变为强阻尼振荡。

参考文献

[1] 梁才,刘文颖,周喜超,等. 750 kV 电网在甘肃电网中的降损作用分析[J]. 电网技术,2012,36(2): 100-103.

[2] 董立娟. 大规模风电接入对甘肃电网安全运行影响的研究[D]. 北京:华北电力大学,2012.

[3] 王官宏 肖洋. 甘肃电网 2009 年动态稳定性研究技术报告[C]. 北京:中国电力科学研究院,HXT2009.

[4] 翁利民,张莉,舒立平,等. 电弧炉对电网的不利影响及其抑制措施 [J]. 供用电,2000,17(3):45-46.

[5] 朱方,赵红光,刘增煌,等. 大区电网互联对电力系统动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报,2007,27(1):1-7.

[6] 王洪涛,刘玉田,雷鸣,等. 电网互联对山东电网内部低频振荡模式的影响[J]. 中国电力,2004,37(6): 12-15.

[7] 邓集祥,贺建明,姚天亮,等. 大区联网条件下四川电网低频振荡分析[J]. 电网技术,2008,32(17): 78-83.

作者简介:

姚 巽(1984),工程师,主要研究方向为电网调度、电力系统稳定性;

宋建光(1980),工程师,主要研究方向为电网调度、电力系统稳定性。

(收稿日期:2016-11-04)

欢迎订阅《四川电力技术》

四川 ± 500 kV 德宝线雷击高风险杆塔 防雷改造设计

彭锦超¹,何俊豪¹,陈 坤²

- (1. 四川安恒电力设计咨询有限公司,四川 成都 610002;
2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司,湖北 武汉 430074)

摘 要:随着直流输电线路的大规模建设,输电距离和输送容量已有相当规模,雷害防治是直流输电线路运维管理面临问题中的重点和难点。四川 ± 500 kV 德宝直流输电线路沿线地形复杂,雷击闪络尤为明显。对四川 ± 500 kV 德宝线运行至今雷击跳闸数据统计,结合线路走廊地闪密度,采用输电线路差异化防雷评估技术,筛选出 20 基雷击高风险杆塔,并提出防雷改造方案,为运维部门后期开展防雷工作提供一定的参考和依据。

关键词: ± 500 kV; 直流输电线路; 雷击闪络; 雷害防治

Abstract: With the large - scale construction of HVDC transmission lines, the transmission distance and transmission capacity has a considerable size, and the lightning damage prevention is an important and difficult point facing by the operation and maintenance management of DC transmission lines. ± 500 kV Sichuan Debao DC transmission line is along the terrain, so the lightning flashover is particularly evident. The data statistics of lightning trip - out in ± 500 kV Sichuan Debao DC transmission line is carried out from it being put into operation till now. Based on the lightning density of line corridor, 20 towers and poles with high risk of lightning stroke are screened based on differential protection evaluation technique against lightning for transmission line, and the improvement for protection scheme against lightning is put forward, which can provide a reference for developing the lightning protection by the operation and maintenance departments.

Key words: ± 500 kV; DC transmission line; lightning flashover; lightning damage prevention

中图分类号: TM726 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2016)06 - 0084 - 04

0 引 言

目前,中国已经建成并投运了共计 14 条直流输电线路,其中 ± 500 kV 直流输电线路 8 条。依据多年对雷电活动的观测和国家电网公司运行数据统计,雷击闪络是直流输电线路运行跳闸的主要原因。± 500 kV 直流输电线路雷击闪络次数占总跳闸次数的 31.64%^[1]。据 2006 年至 2012 年四川电网雷击跳闸情况统计显示,500 kV 线路中绕击跳闸占雷击跳闸总数的 94.6%,因此防治线路绕击跳闸对于线路雷害治理具有重要意义^[2-4]。

± 500 kV 德宝直流输电线路,起于 ± 500 kV 宝鸡换流站直流进线构架,止于 ± 500 kV 德阳换流站直流进线构架。四川境内线路全长 240.03 km(含涪江大跨越 2.748 km),共使用铁塔 498 基,其中直线塔 399 基、悬垂转角塔 5 基、耐张转角塔 94 基;途

中跨越铁路 4 次、高速公路(隧道)3 次、高等级公路 12 次、一般公路 72 次,涪江、嘉陵江各 1 次,通航河流 2 次,220 kV 电力线路 5 次,110 kV 电力线路 4 次,35 kV 电力线路 16 次。全线山区多,地下水丰富,森林分布广,其中沿线经过高大山岭 82.76 km,占 34.48%;山地 104.97 km,占 43.73%;丘陵 29.09 km,占 12.12%;平地 20.78 km,占 8.66%;河网 2.42 km,占 1.01%。

德宝直流四川段自投运以来共发生 4 次雷击闪络故障,雷击闪络率为 1.67 次/(百公里·年),其中 2011 年 7 月 21 日发生的 1 次故障重启未成功。从闪络形式上看,4 次故障初步分析均为绕击故障;从塔型上看,4 次故障中 3 次发生在 JTA1 型转角塔,另有 1 次发生在 GA30 直线塔;从档距上看,4 次故障中 3 次发生在 700 m 以上的大档距,另有 1 次发生在 500 m 左右的档距;从地形上看,4 次故障中 3 次发生在山坡,另有 1 次发生在丘陵;从极性上看,4

次故障中2次发生在负极性的极Ⅱ,2次发生在极Ⅰ。

综合±500 kV 德宝线现有的防雷治理措施和历年跳闸记录,将采用输电线路差异化防雷评估技术,筛选出跳闸率最高的20基杆塔,提出防雷改造方案。

1 雷电特征参数统计研究

采用“线路走廊网格法”来获取德宝直流输电线路走廊雷电活动分布特征分析和典型雷电参数,以四

川省的雷电定位系统监测数据为基础,采用统计法提取出沿线地闪次数、地闪密度等雷电基础参数。

1.1 德宝线线路走廊地闪密度统计结果

通过“线路走廊网格法”,对4条线路走廊2005—2014年的雷电分布情况进行了统计,德宝线走廊地闪密度分布和线路走廊雷电流幅值概率累积曲线结果分别如图1和图2所示。

1.2 线路雷区等级划分

根据德宝直流四川段2010—2015年平均年地闪密度分布进行雷区划分,结果如表1所示。

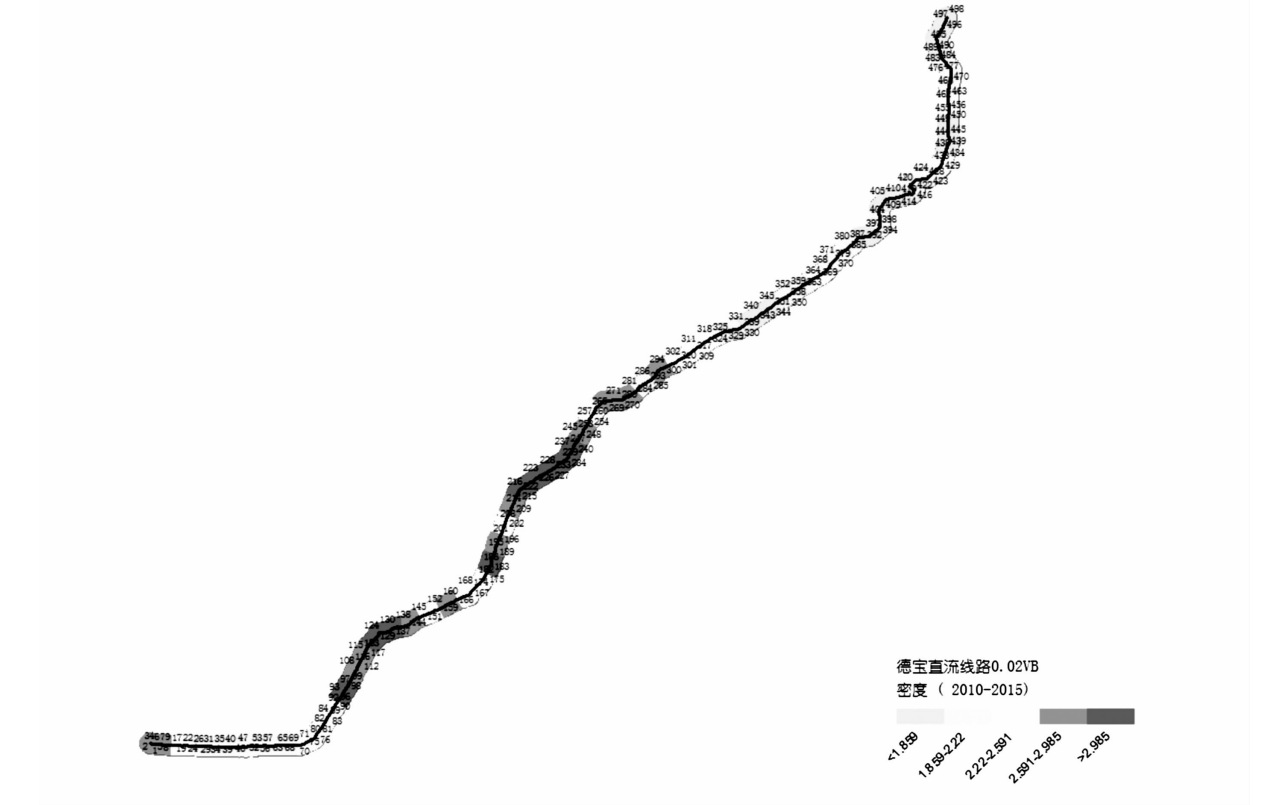


图1 德宝线走廊地闪密度分布

表1 四川±500 kV 德宝线雷区等级划分

地闪密度 (次/km ² ·a)	[0, 0.78)	[0.78, 2)	[2, 2.78)	[2.78, ∞)
杆塔区段		420号~427号 428号~437号 438号~452号 453号~467号 468号~485号 485号~498号	16号~29号 45号~58号 71号~82号 363号~373号 386号~397号 411号~419号 428号~437号	30号~44号 59号~70号 352号~362号 374号~386号 398号~410号 420号~427号 438号~452号
				1号~15号 ~44号 71号~82号 96号~109号 122号~133号 148号~160号 173号~187号 201号~213号 225号~234号 249号~261号 275号~287号 303号~315号 328号~341号
				16号~29号 45号~58号 83号~95号 10号~121号 134号~147号 161号~172号 188号~201号 214号~224号 235号~248号 262号~274号 288号~302号 316号~327号 342号~351号
				30号 59号~70号 83号~95号 10号~121号 134号~147号 161号~172号 188号~201号 214号~224号 235号~248号 262号~274号 288号~302号 316号~327号 342号~351号
区段数量	0	6	14	27

表 2 ±500 kV 德宝线雷击闪络风险评估等级划分指标

雷击跳闸率	$P_r < 0.075$	$0.075 \leq P_r < 0.15$	$0.15 \leq P_r < 0.23$	$P_r \geq 0.23$
风险等级	A	B	C	D

表 3 各雷击闪络风险等级杆塔数量

雷击闪络风险等级	A	B	C	D
杆塔数量	239	138	88	32
百分比	48.09%	27.77%	17.71%	6.44%

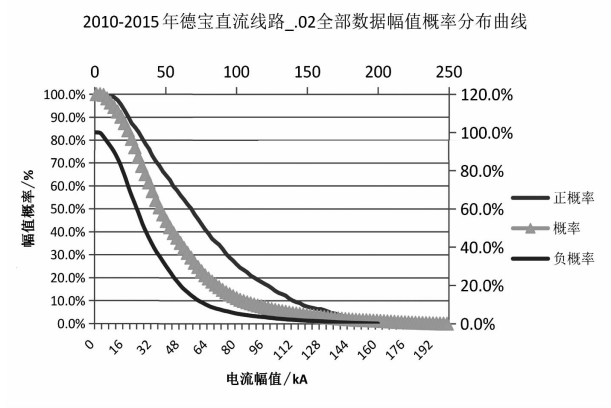


图 2 线路走廊雷电流幅值概率累积曲线

1.3 线路特征参数分析

经过计算,保护角较大的均为耐张塔的悬垂串,其中最大的塔型为 JTC26,保护角分别为 23.38°和 21.60°,共计 4 基铁塔。直路塔的保护角为 8°~12°,其中最大的塔型为 GC16、GC26,保护角为 11.43°,共计 34 基。

2 仿真计算

2.1 雷击闪络风险评估标准

目前,直流输电线路相应的规范仍处于探讨期,因此此次风险评估标准仍以《110 (66) kV ~ 500 kV 架空输电线路管理规范》(以下简称“规范”)为依据,参考线路的实际运行经验等因素来确定。参照规范中绕击跳闸率、反击跳闸率的计算方式,结合德宝线走廊地闪密度平均值为 2.95 次/(km²·a),对线路的雷击跳闸率指标值进行换算,结果为 0.15 次/(百公里·年),其雷击闪络风险等级划分指标见表 2。

2.2 雷击闪络风险评估结果

按照 2.1 节确定的雷击闪络风险评估标准并结合德宝线防雷计算分析结果,采用输电线路差异化评估方法^[4-6]对四川 ±500 kV 直流输电线路沿线杆塔进行了雷击闪络风险评估,各雷击闪络风险等级所占杆塔比例如表 3 所示。

从表 3 可以看到,在综合考虑线路结构特征、地形地貌特征、杆塔绝缘配置、线路走廊雷电活动特征等因素的条件下,确定线路整体雷击风险处于 A、B、C、D 等级的杆塔数量分别为 239、138、88、32 基,所占百分比为 48.09%、27.77%、17.71%、6.44%,如图 3 和图 4 所示。因此,线路整体防雷效果较好的杆塔占总数的 75.86%,相对防雷性能偏低的杆塔共计有 120 基,占到总数的 24.14%。

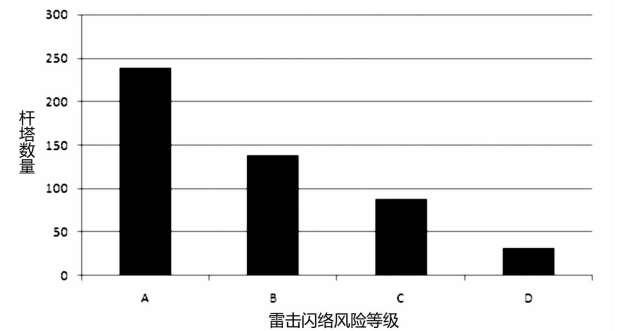


图 3 四川 ±500 kV 德宝线不同雷击风险等级的杆塔数量分布

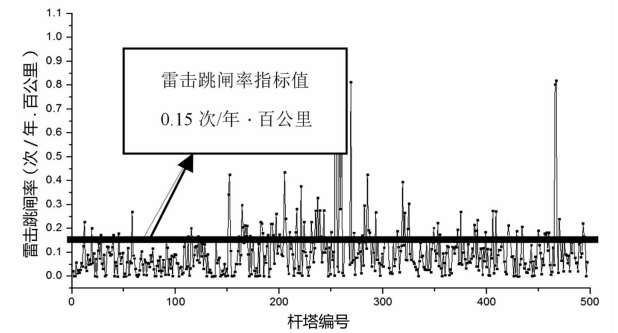


图 4 四川 ±500 kV 德宝线各基杆塔雷击闪络风险分布

3 雷击高风险杆塔防雷方案制定

德宝直流自投运以来,共发生过雷击跳闸事故 4 次,分析结果表明,雷击故障均为绕击雷造成,因此,防雷改造治理方案主要以绕击雷防护为主。

3.1 防雷措施的选择

表 4 高风险雷击杆塔防雷改造方案

改造顺序	改造杆塔号	改造措施	杆塔数
1	151 号、152 号、205 号、221 号、243 号、319 号、325 号	直流线路避雷器	7
	254 号、282 号	可控放电避雷针	2
	375 号、406 号、409 号	可控放电避雷针、降阻接地装置	3
2	115 号、167 号、168 号、287 号、304 号	直流线路避雷器	5
	216 号	可控放电避雷针	1
	429 号、434 号	可控放电避雷针、降阻接地装置	2

根据直流线路历年来的运行经验、线路结构特征以及各种防雷措施的优缺点和适用范围,在线路进行防雷改造时,建议主要采用可控放电避雷针、直流线路氧化锌避雷器及接地降阻装置 3 种措施进行防雷改造。

1)可控放电避雷针

可控放电避雷针作为一种防绕击雷的措施之一,已经在全国各大电网得到了长时间投运。结果表明在接地电阻有保障的情况下,其防绕击效果比较客观,其经济造价较低,安装方便且不需要停电,但可控针的保护范围有限,因此比较适合于小档距、低电阻的杆塔。

2) ±500 kV 直流线路避雷器

统计现有防雷措施运行情况,装设避雷器是最有效的防雷手段。±500 kV 直流线路避雷器在全国部分地区已经得到了应用^[6-10],防雷效果比较显著。对于雷击跳闸率较高的杆塔,在对其进行防雷改造时,氧化锌避雷器应该作为主要的防护措施之一。

3)降阻接地装置

根据实际测量各线路杆塔的接地电阻值,有部分杆塔的接地电阻比较大。对于安装可控针的杆塔,建议相关部门对其接地电阻进行核实,对阻值没达到要求的杆塔应及时采用适当的降阻措施。

3.2 防雷改造杆塔范围和次序

综合线路历年运行经验雷击杆塔的特点、线路已有防雷措施及线路总体的雷击闪络风险评估结果共筛选出高风险雷击闪络杆塔 20 基,改造措施和改造顺序见表 4 所示。

4 结 论

1)四川 ±500 kV 德宝直流输电线路杆塔处于

地闪密度高于 2.78 次/(km²·a)的区段占总线路的 87%。线路整体雷击风险处于 A、B、C、D 等级的杆塔数量分别为 239、138、88、32 基,所占百分比为 48.09%、27.77%、17.71%、6.44%,防雷性能偏低的杆塔共计有 120 基,占到总数的 24.14%。

2)综合线路历年运行雷击杆塔的特点、线路已安装防雷措施及线路总体的雷击闪络风险评估结果,四川 ±500 kV 德宝直流输电线路主要以防雷电绕击为主。

3)四川 ±500 kV 德宝直流输电线路筛选出高风险雷击闪络杆塔 20 基,主要采用直流线路避雷器、可控放电避雷针和降阻装置 3 种改造措施。

参考文献

[1] 吴焯军,赵淳,张伟忠,等. 直流输电线路雷害现状与分析[J]. 高压电器,2014,5(5):134-139.

[2] 刘守豹,许安,崔涛,等. 避雷器在输电线路绕击雷害治理中的应用[J]. 电瓷避雷器, 2014(2):92-965.

[3] 杜颖. 超(特)高压输电线路耐雷性能计算方法综述[J]. 广东电力,2010,23(9):15-20.

[4] 刘守豹,李江陵,王红梅,等. 500 kV 交直流线路雷击特性比较研究[J]. 四川电力技术,2013,10(36):13-16.

[5] 郝俊琦,李琳,王平. 基于蒙特卡罗法的超高压输电线路绕击跳闸率的计算[J]. 华北电力大学学报,2012,39(5):35-41.

[6] 谷山强,陈家宏,陈维江,等. 输电线路防雷性能时空差异化评估方法[J]. 高电压技术,2009,35(2):294-298.

[7] 陈家宏,吕军,钱之银,等. 输电线路差异化防雷技术与策略[J]. 高电压技术,2009,31(12):2891-2902.

[8] 赵淳,陈家宏,王剑,等. 电网雷害风险评估技术研究[J]. 高电压技术,2011,37(12):3012-3021.

(下转第 94 页)

微网经济调度研究综述

燕振刚¹,张雪霞¹,刘晋勇²,钟伟³,马锡良³,邹兴³

(1. 西南交通大学电气工程学院,四川 成都 610031;

2. 国网四川省电力公司计量中心,四川 成都 610045;

3. 国网四川省电力公司成都供电公司,四川 成都 610041)

摘 要:针对微网经济调度问题,综合现有文献分别从微网经济调度模型的种类、微源不确定性因素的处理方法和多时间尺度调度进行论述。其中微网经济调度模型主要从静态模型和动态模型两方面论述;不确定性因素处理方法分为确定性方法、模糊理论法和随机概率分布函数法;多时间尺度经济调度主要分为基于短期预测技术的日前调度、基于超短期预测技术的日内调度和基于“秒”级的实时调度。最后,对微网群集调度具有研究前景的方向做了展望。

关键词:微网;经济调度;不确定性;模糊理论;概率分布函数;多时间尺度

Abstract: Aiming at the economic dispatch problems of micro-grid and according to the existing literatures, the classification of micro-grid economic scheduling model, methods of dealing with uncertain factors and multiple time-scale dispatch in the micro-source are discussed. Wherein, the economic dispatch model of micro-grid can be divided into static model and dynamic model; the methods of dealing with uncertain factors is mainly include deterministic method, fuzzy tool and stochastic probability distribution function technique; multiple time-scale dispatch in the micro-source mainly focuses on day-ahead scheduling based on super short time forecasting technique, daily scheduling based on super short time forecasting technique and real time scheduling based on "second". Finally, through comprehensive analysis, some promising research directions of micro-grid cluster scheduling are included.

Key words: micro-grid; economic dispatch; uncertainty; fuzzy theory; probability distribution function; multiple time scales

中图分类号:TM727 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2017)02-0088-07

0 引 言

面对能源短缺、环境污染等问题,可再生能源的开发与利用成为重要的发展趋势。微网作为一种可以充分利用可再生能源的有效方式,是将多种微源、储能装置和各类负荷集合在一起,构成的一个可控系统。以孤岛和并网两种方式运行,对节能、减小污染和充分利用分布式发电发挥着重要作用。为合理有效地利用各种微源,微网经济调度是在满足一定约束条件和负荷需求下,合理地调度微源和储能装置出力,有效地减小运行成本和提高环境效益,对微网优化运行起着重要的作用。

然而在微网经济调度问题的研究中,影响经济运行结果的因素有很多,归纳起来主要有以下几个方面:1)微网经济调度模型;2)求解这类优化问题算法;3)微源和负荷随机性;4)微源控制策略;5)不

同调度时间尺度等。这些因素的影响是微网经济调度研究的重要内容,从系统本身的角度来讲,微网模型、微源随机性处理方法和不同时间尺度 3 个因素影响比较关键,下面从这 3 个方面来进行综述。

1 微网经济调度模型研究

微网经济调度模型是经济调度研究的核心内容,对微网运行的合理性和可行性有着直接的影响。模型中包含的微源种类、约束条件的设定和考虑的目标函数都将对优化结果产生影响。经济调度根据是否考虑了不同时间断面之间的关联,主要分为静态经济调度和动态经济调度。静态经济调度是忽略了各时间段之间的联系,仅仅研究单一时间断面的优化方案;动态经济调度为了加强不同时间段之间的关联性,增加了可控微源的爬坡率约束。根据现有文献的研究成果详细论述两种经济调度模型的特

点。

1.1 静态经济调度模型

静态经济调度是基于当前时段负荷的需求以及微源的运行维护成本,在满足负荷和约束条件下,按照经济性最优的原则依次调度设备的启停和对应的输出功率。通常忽略各时间段之间的互相关联,独立对每一时间段进行优化。这类模型中可再生能源是以当前时刻风、光的有效出力作为确定值来处理的,忽略其随机性对经济运行的影响。文献[1]考虑了功率平衡约束、微源出力约束和电池的充放电深度,以运行维护成本最小为目标函数,建立了微网静态经济调度模型。文献[2]建立了微网静态多目标经济调度模型,模型中风、光和负荷都是作为确定量处理的。充分考虑了微源运行维护成本、环境成本、容量短缺和未满足的负荷等目标函数,多目标函数应用模糊评价函数进行求解。

针对微网同时承担冷、热、电3种负荷供应的情况,研究了微网冷热电联供经济调度模型。文献[3]提出了包含蓄能装置的微网冷热电联供模型,约束中充分考虑冷热电供需平衡、微源和蓄能装置的出力约束,以运行维护成本最小和环境效益最高为多目标函数。运行结果显示,蓄电池有利于运行的经济性,蓄热蓄冷装置降低了燃气轮机的运行成本。文献[4]研究了冷热电联供微网经济环保调度模型,增加了热备用约束和热平衡约束,将蓄电池虚拟放电和充电价格计入目标函数中,建立分阶段寻优目标函数。文献[5]在并网运行条件下,建立了冷热电联供系统的经济调度模型,研究发电成本、分时电价和电能交易对微源有功出力值的影响。

从微网静态经济调度模型的研究可以看出,模型中包含的随机性微源一般作为确定值处理;约束条件也相对单一,一般多以功率平衡约束和微源出力约束为主。目标函数一般是运行维护成本,环境效益成本,冷、热收益和电能交易成本中的一个目标或多个目标的组合形式。但是,静态模型忽略了影响经济运行结果的重要因素,如微源随机性、可靠性约束、爬坡率约束等;动态经济调度模型则更加全面地包含了这些因素,并讨论了其对运行结果的影响。

1.2 动态经济调度模型

这类模型有别于静态模型,考虑了可控微源爬

坡率约束和储能装置剩余容量约束等因素的影响。运行时间上具有更强的耦合性,为了加强时间耦合性,文献中关于储能装置剩余容量的约束,要求在一个调度周期前后容量保持一致。对微源的出力调度往往是以调度周期内综合效益最大化为目标进行的,目标函数更加多样,如增加了可靠性目标。约束条件增加了机组爬坡率约束、储能剩余容量约束、备用约束、潮流约束等。文献[6]研究了包含钠硫电池储能的微网动态经济调度模型,动态特性体现在调度周期始末电池能量状态保持不变,同时加入钠硫电池有效地平抑了可再生能源和负荷出力波动。文献[7]研究了孤岛系统经济调度模型,模型中增加了可控机组爬坡率约束、可靠性约束。针对可再生能源功率波动性问题,加入了失负荷风险指标和风光浪费指标,保证供电可靠性和可再生能源的高效利用。文献[8]研究了动态经济调度模型,考虑了功率平衡约束、微源出力约束和爬坡率约束,功率平衡约束的求解是采用潮流计算方法实现的,并且可以根据出力和负荷情况实时进行调节。文献[9]在并网运行条件下,研究计及分时电价冷热电联供微网动态经济调度模型,充分考虑机组启停、爬坡率约束和储能约束条件,但是该模型中忽略了可再生能源随机性的影响。针对这一忽略的问题,文献[10]在热电联产经济调度模型中引入热泵装置,不仅可以有效地消纳过剩的风电减少弃风、减小储能的充放电次数和节约燃料,而且能够承担部分热负荷。文献[11]提出基于电热联合调度的区域并网型微网运行优化模型,该模型有效地克服了以往热电联供模型中电热之间相对独立和燃气轮机通常是完全跟踪热负荷而无法参与到电能调度中来的问题。这类模型综合考虑了启停及爬坡约束、出力约束和储能的充放电特性。

上述模型中的动态特性主要体现在约束上,如爬坡率约束、储能约束等条件。另外,考虑微源随机性的动态经济调度模型也是研究的热点。文献[12]为了克服各时间段之间联系不足的问题,充分考虑可再生能源随机性,钠硫电池的引入不仅可以平抑微源随机性波动,也可以加强不同时间断面之间的关联。文献[13]综合考虑了可在生能源的功率波动,负荷预测误差和机组启停故障等随机因素,

建立了动态调度的机会约束规划模型。模型中,系统可靠性约束通过一定置信水平下的旋转备用来体现,目标函数也是在一定置信水平下达到运行费用最小。文献[14]针对微网中可再生能源和负荷功率等随机性的影响,目标函数考虑制热收益,建立了基于机会约束规划的热电联产经济调度模型。约束条件的处理方式和目标函数的求解与文献[13]相同。文献[15]针对风、光出力随机性和热负荷波动性,建立了基于机会约束规划的动态经济调度模型,增加了热平衡约束、热电耦合约束和蓄热槽运行约束等,蓄热槽的作用是对热电联产“以热定电”约束解耦。

目前研究计及需求侧响应的微网动态经济调度模型有很多。如文献[16]对一个包含可再生能源的微网动态经济调度模型,考虑了分时电价差异,建立了基于不同电价的优化目标和约束条件,优化各时段内微源的出力。文献[17]建立了包含需求侧响应的微网经济调度模型,以需求侧负荷中的可转移负荷为研究对象,结合分时电价,对不同时段负荷转移进行分析,分析负荷转移对综合成本的影响。文献[18]在经济调度模型中考虑负荷满意度指标,将可中断负荷以可平移和不可平移两种状态进行研究,研究表明如果能够提高需求侧的管理,可以有效实现可再生能源的最大化利用和运行效益的最大化。文献[19]提出了一种考虑负荷中断的微网并网经济调度模型,通过引入反应中断功率和中断时间影响的浮动电价,来反映用户满意度的变化,并有效降低并网运行成本。

近年来,电动汽车普遍应用,计及电动汽车接入微网经济调度的研究吸引了学者们的兴趣。确定合理的电动汽车入网负荷特性曲线成为这类模型研究的关键点。文献[20]为了得到不同规模下电动汽车入网负荷特性曲线,对电动汽车的充放电行为应用蒙特卡洛法模拟,并研究接入电动汽车的微网多目标经济调度模型。文献[21]研究了电动汽车对微网经济运行的影响,同样是应用蒙特卡洛模拟法仿真电动汽车的充放电行为,在分时电价的机制下,以效益最大化为目标,讨论电动汽车无序充电和有序放电行为对微网运行经济性的影响。

综上所述,微网动态经济调度模型中增加可以

加强时间关联性的约束条件,考虑了可再生能源和负荷输出功率波动性的影响,讨论了需求侧响应和电动汽车入网而引入新的随机因素对微网经济调度的影响。其中,针对可再生能源随机性的影响,选择合理有效处理随机性的方法是十分有必要的,下面就现有文献进行归类总结。

2 微源随机性问题的处理方法

微网系统中风、光电本身的不确定性和预测误差带来的不确定性,在调度过程中往往会出现功率的盈余或缺失,会造成系统经济成本的增加和可靠性的降低。因此应用有效处理随机性的方法来解决这类不确定性的问题具有重要的意义,大致可以分为以下几种方法。

2.1 处理随机性问题的确定性方法

应用确定性方法处理可再生能源随机性问题,就是利用储能装置或响应速度快的可控负荷来补偿因为随机性造成的发电量的盈余和不足。如文献[12]提出了应用钠硫电池来平抑可再生能源出力的波动,有效地解决了功率波动对经济调度的影响。文献[22]的海岛微网经济调度模型,针对风能间歇性和随机性的特征,提出一种将海水抽蓄电站作为储能设备,配合风电,柴油机组构成微网为海岛供电。这种方案很好地解决了风电出力波动带来的影响,显著降低了供电成本,且环境污染小。文献[23]在含有风电场的经济调度模型中引入正、负旋转备用约束,以应对风电功率波动对调度结果带来的影响。随着研究的深入,利用需求侧响应的“源-荷”双侧调度来平衡微源随机性引发的波动越来越普遍。如文献[24]在调度模型中考虑价格型需求响应,研究表明需求响应可以提高风电的消纳能力。文献[25]在风电调度模型中计及实时电价的需求响应,分析了价格型响应负荷对间歇性能源接入的影响。文献[26]综合考虑“源-荷”特性,在调度模型中引入可中断负荷和分时电价这两种需求侧响应,以应对风电的反调峰特性和间歇性。

但是研究发现,这种方法是以高运行成本和低可靠性为代价来解决问题的,而且误差较大,不能完全反映微源随机性对经济调度的影响。

2.2 处理随机性问题的模糊理论建模方法

应用模糊理论建模方法处理微源随机性问题,就是对负荷预测值和可再生能源输出功率的不确定性,采用模糊变量进行表示。文献[27]为解决风电不确定性问题,基于模糊理论采用梯形模糊数来表示每个优化时段的风电出力,建立了包含风电场的动态经济调度模糊模型。为更好地表达决策者的意愿,构建风电有功出力和总成本的隶属度函数和满意度指标,更好地适应风电输出功率的随机性。文献[28]也是通过对风电的模糊化建模,将风险引入目标函数中,求取风险成本和发电成本两个目标函数的最优解。同时文献[29]进一步证明模糊理论可以很好地解决含有不确定性风电的短期经济调度问题。但是模糊建模的关键在于准确确定模糊变量的隶属度函数,隶属度函数本身不具有对偶性,传统的模糊理论只能给出“可能性”的结论,很难给出“可信性”结论^[30]。为了解决这一问题,已有文献将模糊理论和可信度结合来处理风电的不确定性问题。文献[31]将间歇式微源出力和负荷用模糊参数表示,将确定性约束改为模糊参数下的约束,并基于可信性理论建立了含多模糊参数的模糊机会约束模型。文献[32]考虑风电预测误差的模糊性,结合可信性理论和模糊机会约束规划研究模糊置信水平下的动态经济调度问题。

2.3 处理随机性问题的概率分布函数方法

除了应用模糊理论解决不确定性问题,还包括基于随机概率分布的概率建模方法。概率分布函数的确定主要是基于风速、风电场出力和风电功率的预测误差来进行的。不同的概率分布模型将会对结果有着直接的影响。实际中风电预测比负荷预测更加困难,为了突出预测的不确定性,通常的做法是对预测误差建立概率分布模型。例如文献[33]考虑了风速预测结果,并且分别利用几种不同的随机分布函数来描述风速预测误差,阐述不同概率密度函数对优化结果的影响。文献[34]对风电误差进行统计,得到不同风电功率输出水平下的误差概率分布模型,预测误差在预测值附近一般服从正态分布。文献研究表明采用正态分布密度函数来描述预测误差的概率分布和实际误差分布函数较吻合。如文献[35]通过对风速预测来推导风电功率的概率分布

函数,风速预测误差采用正态分布函数描述,在经济调度中有着很好的表现。从建模的方法上可以看出,概率分布函数建模方法较模糊模型能够更加准确地描述风电功率的不确定性。

随机规划方法作为一种能够有效解决含有随机变量优化问题的方法,对考虑风电功率随机分布的经济调度问题有着广泛的应用。文献[36]针对风电的随机性的影响,在风速预测的基础上,应用随机规划理论建立了动态的经济调度模型。而机会约束规划可以有效地解决给定置信水平下具有随机变量的优化问题。文献[37]是应用机会约束规划来解决包含随机因素的经济调度模型。模型中的约束以概率的形式表示,风电的随机性问题得到了有效的解决。文献[38]建立了基于机会约束规划的孤岛模式微网经济调度模型,风光出力和负荷预测误差用随机变量表示,供电可靠性通过一定置信水平下的旋转备用表示。

但是随机规划方法是建立在已知随机变量的精确概率分布的基础之上的,实际中获得这类微源和负荷的概率分布比较困难。为了更好地解决随机性的问题,文献[39]采用区间数优化方法。一般对于变量的上下界很容易得到,利用区间描述变量的不确定性,基于区间序关系的转换方法^[40],将模型中不确定的区间优劣比较转化为确定性的数值大小比较。文献[41]针对可再生能源出力和负荷的不确定性,采用区间数对风速、光照强度以及负荷的变化进行描述,提出基于区间线性规划的微网经济调度模型。文献[42]考虑风电和负荷预测值不确定性,应用随机模糊变量描述风电功率,以区间形式表述负荷预测的不确定性,利用负荷不等式区间约束将遗传算法的初始寻优种群模糊化,建立了电力系统随机模糊多目标交易计划模型。其中,区间模糊数学和随机数学是处理不确定性信息的主要方法^[32]。

2.4 处理不确定性问题的场景分析法

在已知随机变量的概率分布情况下,一般可以通过抽样的方法来求解。文献[23]应用极大似然估计从风速样本中抽取数据,进而转化为风电功率,此种方法因抽样规模不同误差较大。文献[43]针对微网系统中风、光出力随机性的问题,采用点估计

法解决优化模型中随机变量的问题。文献[44]风电的随机性是通过场景模拟的方法来解决,采用拉丁超立方采样获得场景集,并利用基于概率距离的场景削减技术得到削减后的场景概率集,建立了考虑风电随机性的微网动态经济调度模型。

场景集分析方法是把具有连续概率分布的随机性向量离散成场景集合^[45],把随机优化问题转化为确定性问题。场景法可以明确体现不确定因素的概率特征,重点是研究场景的生成和场景集的削减两个方面。场景集的生成方法现有文献主要有以下几种抽样方法:采用蒙特卡洛法抽样得到大规模场景集^[46];采用基于自回归滑动平均模型,并考虑风速多时刻之间的耦合性^[47];通过风电预测功率谱密度来构造场景集,应用线性回归对历史数据进行分析^[48]。但是这类场景集的生成方法需要足够巨大的抽样规模,才能保证得到的场景集对原分布的近似。场景削减的方法包括快速向前选择法、向后削减法和场景树构造法等。但是这类方法通过遍历搜索手段来得到最优场景集,所以规模太大导致计算效率低。文献[45]提出一种处理风电功率随机性的模型,基于 Wassertein 距离衡量指标^[49],得到风电功率分布的最优近似场景;并采用基于 $k - me$ -doids 的聚类方法得到削减后的场景模型,结果显示近似程度高,计算速度快。所以场景分析求解概率模型关键是选择合适的方法得到场景集合,并应用高效的削减技术得到具有代表性的概率场景。

3 微网多时间尺度经济调度

微网不同时间尺度经济调度本质上是减小运行误差,使微网系统的抗干扰能力增强,更好地消纳间歇性分布式电源。主要目的是平抑由于可再生微源和负荷的随机性带来的影响。目前关于多时间尺度的经济调度问题的研究主要从日前和日内两个时间尺度进行研究。

文献[50]的研究弥补了基于短期功率预测技术。单一的日前调度并不能完全反映可再生能源和负荷的预测误差以及非计划瞬时波动功率对能量管理系统的影响。结合基于超短期功率预测技术的日内调度,在不改变日前调度计划的前提下来优化网

内的备用电源、储能装置的出力值,两者协同共同优化各微源的有功出力。文献[51]提出了一种基于模型预测控制的日内滚动优化校正策略,采用有限时间窗内的滚动优化代替传统单断面优化,提前感知未来一段时间内的可再生能源出力以及联络线计划的变化情况,对机组出力进行调整,并结合时域滚动和系统实时状态反馈,来消除随机性的影响。日前经济调度多以小时为时间尺度,但是由于微源和负荷的随机性使得预测误差较大,需要实时性强的超短期预测来对其修正。一个是以“时”为尺度,另一个是以“分”为尺度,两者的时间跨度较大。文献[52]针对这一问题,在超短期和实时调度之间加入基于准则的功率分配,快速消纳可再生能源和负荷的功率波动环节,减小联络线的功率波动。文献[53]提出时计划、调整计划及实时计划多时间尺度的协同优化控制方法。加入时间尺度为 15 min 的调整计划,以预测曲线为目标,动态修正微源发电计划,逐级平抑因误差造成 PCC 功率波动;在以 1 min 为时间尺度的实时计划中,利用储能装置快速跟踪负荷的能力,平抑因为突发事件产生的波动。因此,研究微网动态经济调度不能仅仅依靠日前经济调度,更需要多时间尺度协调优化。

4 展 望

目前的研究主要集中在单一微网经济调度问题。但是单一微网的工作容量有限,抗干扰能力较弱,运行工作过程中容易出现分布式电源出力突变,负荷的接入或脱离等问题,运行可靠性较差。近年来,微网群集经济调度作为一种新的组网方式,通过子微网及分布式电源之间的能量调度和互补,可以进一步提高分布式电源的渗透率。但是目前国内关于微网群集调度的研究还比较少,未来关于微网群集调度的研究,在微网群的组网方式、子网间的协调控制和微网群能量管理等方面值得做一些深入的研究。

参考文献

- [1] 郭佳欢. 微网经济运行优化的研究[D]. 北京:华北电力大学,2010.
- [2] 周晓燕,刘天琪,沈浩东,等. 含多种分布式电源的微

- 电网经济调度研究[J]. 电工电能新技术, 2013, 32(1): 5-8.
- [3] 戚建文, 任建文, 渠卫东, 等. 冷热电联供微网环保经济调度研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(25): 90-97.
- [4] 宋晓英, 王艳松. 基于协同进化遗传算法的微网经济环保调度[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 85-89.
- [5] 牛铭, 黄伟, 郭佳欢, 等. 微网并网时的经济运行研究[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 38-42.
- [6] 丁明, 张颖媛, 茆美琴, 等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 7-14.
- [7] 罗毅, 刘明亮. 计及风险备用约束的孤网系统环保经济调度[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2705-2711.
- [8] 宁阳天, 李相俊, 麻秀范, 等. 基于改进粒子群算法的微网动态经济调度[J]. 电力建设, 2014, 35(6): 26-30.
- [9] 吴雄, 王秀丽, 别朝红, 等. 含热电联供系统的微网经济运行研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8): 1-6.
- [10] 郭宇航, 胡博, 万凌云, 等. 含热泵的热电联产型微电网短期最优经济运行[J]. 电力自动化设备, 2015, 39(14): 16-23.
- [11] 李正茂, 张峰, 梁军, 等. 含电热联供系统的微电网运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3569-3577.
- [12] 黄伟, 黄婷, 周欢, 等. 基于改进微分进化算法的微电网动态经济优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 211-217.
- [13] 刘小平, 丁明, 张颖媛, 等. 微网系统的动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 77-84.
- [14] 肖青, 陈洁, 杨秀, 等. 含多种分布式电源的微网动态经济调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(4): 22-29.
- [15] 刘方, 杨秀, 黄海涛, 等. 含热电联产热电解耦运行方式下的微网能量综合优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(1): 51-58.
- [16] 刘方, 杨秀. 分时电价下考虑预测偏差的微网经济运行[J]. 陕西电力, 2016, 44(4): 65-71.
- [17] 邵靖珂, 汪泓, 谭阳红, 等. 计及需求侧相应的微网经济优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(10): 31-37.
- [18] 曾君, 徐冬冬, 刘俊峰, 等. 考虑负荷满意度的微电网运行多目标优化方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3325-3335.
- [19] 赵猛, 丁晓群, 刘远龙, 等. 考虑负荷中断的微网并网经济调度[J]. 电力建设, 2016, 37(4): 57-63.
- [20] 吴红斌, 侯小凡, 赵波, 等. 计及可入网电动汽车的微网系统经济调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 77-84.
- [21] 陈深, 毛晓明, 林泽坤. 电动汽车对微网优化运行的影响分析[J]. 电力学报, 2014, 29(6): 473-479.
- [22] 范刘洋, 汪可友, 李国杰, 等. 含有海水抽蓄电站的海岛微网优化调度[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 381-386.
- [23] 周玮, 彭昱, 孙辉, 等. 含风电场的电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(25): 13-18.
- [24] Le Xie, Joo J Y, Ilic M D. Integration of Intermittent Resources with Price Responsive Loads [C] // 41st North American Power Symposium In. USA: IEEE Computer Society, 2009: 1-6.
- [25] Hamidi V, Li F, Robinson F. The Effect of Responsive Demand in Domestic Sector on Power System Operation in the Networks with High Penetration of Renewables [C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, USA, 2008: 1-8.
- [26] 刘小聪, 王蓓蓓, 李扬, 等. 智能电网下计及用户侧互动的发电日前调度计划模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 30-38.
- [27] 陈海焱, 陈金富, 段献忠. 含风电场电力系统经济调度的模糊建模及优化算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 22-26.
- [28] Wang L F, Singh C. Tradeoff between Risk and Cost in Economic Dispatch Including Wind Power Penetration Using Particle Swarm Optimization [C] // International Conference on Power System Technology, Chongqing, China, 2006: 1-7.
- [29] Hong Y Y, Li C T. Short-term Real-time power Scheduling Considering Fuzzy Factors in an Autonomous System Using Genetic Algorithms [J]. The Institution of Engineering and Technology, 2006, 153(6): 684-692.
- [30] 黄国栋, 李伟刚, 李振斌. 大规模风电接入的电网发电调度研究综述[J]. 电测与仪表, 2015, 52(9): 1-6.
- [31] 熊虎, 向铁元, 陈红坤, 等. 含大规模间歇式电源的模糊机会约束机组组合研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 36-44.
- [32] 艾欣, 刘晓. 基于可信性理论的含风电场电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(21): 12-18.

[33] JABR R A, Pal B C. Intermittent Wind Generation in Optimal Power Flow Dispatching[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2009, 3(1): 66 – 74.

[34] 孟祥星,王宏. 大规模风电并网条件下的电力系统调度[J]. 东北电力大学学报,2009,29(1):1 – 7.

[35] Siahkali, Vakilian, M. Stochastic Unit Commitment of Wind Farms Integrated in Power System[J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80 (9): 1006 – 1017.

[36] 孙元章,吴俊,李国杰,等. 基于风速预测和随机规划的含风电场电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 41 – 47.

[37] 江岳文,陈冲,温步瀛. 基于随机模拟粒子群算法的含风电场电力系统经济调度[J]. 电工电能新技术, 2007,26(3): 37 – 43.

[38] 任建文,渠卫东. 基于机会约束规划的孤岛模式下微网动态经济调度[J]. 电力自动化设备,2016,36(3): 73 – 80.

[39] 朱祥祥,黄崇鑫,岳东. 等. 基于区间不确定性的微网有功 – 无功联合优化调度[J]. 电力系统自动化, 2016,40(15):39 – 47.

[40] Liu Y, Jiang C, Shen J, et al. Coordination of Hydro Units with Wind Power Generation Using Interval Optimization[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015,6(2):443 – 453.

[41] 王守相,王栋,韩亮. 考虑不确定的微网日前经济优化调度区间线性规划方法[J]. 电力系统自动化, 2014,38(24):5 – 13.

[42] 马瑞,康仁,姜飞,等. 考虑风电随机模糊不确定性的电力系统多目标优化调度计划研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(1):150 – 156.

[43] 李武强,余涛,林建泉,等. 考虑随机性的微电网环保经济运行优化[J]. 电力系统及其自动化学报,2015, 27(3):81 – 87.

[44] 戴仲覆,陈涛,于文俊. 一种在微网动态经济调度中考虑风电随机性的方法[J]. 发电与空调,2013,34(5):1 – 5.

[45] 王群,董文略,杨莉. 基于 Wasserstein 距离和改进 K – medoids 聚类的风电/光伏经典场景集生成算法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(11):2654 – 2662.

[46] 王蓓蓓,刘小聪,李扬. 面向大容量风电接入考虑用户侧互动的系统日前调度和运行模拟研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(22):35 – 44.

[47] Zhang Jianyong, Wang Cong. Application of ARMA Model in Ultra – short Term Prediction of Wind Power[C]//2013 International Conference on Computer Sciences and Applications (CSA), Wuhan, China; Hubei University of Technology,2013: 361 – 364.

[48] Due hee L, Ross B. Future Wind Power Scenario Synthesis through Power Spectral Density Analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2014,5(1):490 – 500.

[49] 黎静华,韦化,莫东. 含风电场最优潮流的 Wait – and – See 模型与最优渐近场景分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(22):15 – 23.

[50] 郭思琪,袁越,张新松. 等. 多时间尺度协调控制的独立微网能量管理策略[J]. 电工技术学报,2014,29(2):122 – 128.

[51] 肖浩,裴玮,孔力. 基于模型预测控制的微电网多时间尺度协调优化调度[J]. 电力系统自动化,2016,40(18):7 – 16.

[52] 窦晓波,徐慈慧,董建达,等. 微电网改进多时间尺度能量管理模型[J]. 电力系统自动化,2016,40(9):48 – 56.

[53] 茆美琴,张永宁,王杨洋,等. 削峰填谷策略下微电网多时间尺度能量优化[J]. 南方电网技术,2016,10(8):23 – 32.

作者简介:
燕振刚(1991),硕士研究生,研究方向为微电网经济调度。

(收稿日期:2016 – 11 – 13)

(上接第 87 页)

[9] 张思寒. 避雷器配置方式对 220 kV 同塔多回输电线路防雷效果研究[J]. 电瓷避雷器,2015(2):82 – 86.

[10] 彭晓亮,陈坤,刘新,等. ± 500 kV 直流线路避雷器在江城线的应用[J]. 电瓷避雷器, 2014(4):111 – 115.

[11] 苏杰,曹炯,姜文东,等. 220 kV/110 kV 同塔四回输电线路双回同时闪络耐雷性能及防治[J]. 电瓷避雷器,2013(5):90 – 96.

[12] 詹花茂,李成榕,陈秀娟,等. 线路避雷器安装方案及效果分析[J]. 电瓷避雷器,2004(3):32 – 35.

作者简介:
彭锦超(1983),工程师,研究方向为电力工程设计。

(收稿日期:2016 – 11 – 07)