基于CIGRE TB 358的配电电缆状态评估与寿命管理方法研究

以国际大电网（CIGRE TB 358）提出的关于目前地下交流电缆的剩余寿命管理方法为基础，对该方法的部分评分方法进行国内的适应性修订，将其试用于深圳福田区的45段10 kV配电电缆的状态评估。按照所评估分数对电缆进行状态分级，此分级结果可用来指导电缆预防性试验的优先次序及为寿命管理的决策提供参考。

皮昊书[1] 霍小晶[2] 邱 铨[1] 徐 阳[2]/1.深圳供电局有限公司 2.西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室

皮昊书/工程师

关键词/Keywords
寿命管理·
状态评估·
配电电缆·

0 引言

深圳电网是我国四个特大型城市电网之一，截至2013年底，深圳地区10 kV配电网线路电缆化率已达88%。近年来，深圳电网发生的电缆类故障在总故障中所占比例已超过50%，电缆故障已成为影响深圳电网供电可靠性的重要问题之一[1]。据统计，深圳市福田区配电电缆总长度已经达到2 592 km，近五年内电缆类故障约有288起[2]。如何对配电电缆状态进行有效的监控管理成为行业内的热议话题。

关于电缆的状态与寿命评估方面，国内外学者都进行了大量的研究。在1968年地下直埋式的XLPE电缆的绝缘中首次发现水树枝[3]，在潮气和电场的共同作用下，水树枝是诱发电力电缆破坏的主要原因。影响水树枝生长的因素很多，包括场强、频率、温度及材料结构等[4]。1958年，美国学者D. W. Kitchin和O. S. Pratt利用交流、直流和冲击电压首次对PE中的电树枝进行了研究，发现电树枝化是绝大部分绝缘击穿的先兆[5]。此外，国外从20世纪60年代就开始研究XLPE的电缆绝缘老化检测技术[6]。近年来，国内电力行业资产管理工作逐渐加强，电力可靠性数据的收集[7]、电力大数据挖掘分析的提出等均推进了电力设备的剩余寿命评估与资产管理工作的开展[8]。

2008年，国际大电网（CIGRE）在巴黎成立的“现役地下电缆剩余寿命”技术工作组，提出了基于43家运行单位调研分析结果的电缆状态评估的新方法[9]，此管理方法在对电缆的状态做出评判时综合考虑了技术指标、经济指标和策略指标3个方面的内容，对所考虑对象的3个指标分别设置相关问题进行各指标的评判后，使用相应的数学方法计算出总分数，根据最终分数进行电缆状态的总体分级与判断。本文使用这种管理方法对深圳市福田供电局配电电缆运行的实际情况进行调整，抽取了45段不同情况的配电电缆进行评估，最终结果尝试用来辅助深圳市福田区配电电缆的日常维护与管理决策。

1 针对深圳市福田区配电电缆状态评估的信息调整

CIGRE TB 358技术报告对于电缆寿命终止的总体观点是：电缆寿命的终止除了普遍认为的老化或劣化至退役外，也应该包括此对象的维修维护费用是否超过预期承受而使其寿命终止，或者是现行的社会政策与战略要求进行对象的更换，即策略意义上的寿终。据此，对于电缆整个状态的评估应该从技术性、经济性和策略性3个方面入手。但由于电

网管理与运行方式的差异性，如果简单地将在欧洲使用的该评估方法用到我国电网之中，会存在一些不适用之处。

1.1 对CIGRE TB 358技术性信息的调整

技术性信息主要从运行年限、负荷水平、故障情况和敷设情况4项内容进行相关问题与分值的设置，我国目前判断是否进行电缆更换的主要依据是电缆的运行年限，深圳市发展较晚，大部分电缆运行年限不超过30年。电缆的长期带电运行中负荷水平是需要考虑的另一个重要因素，深圳市福田区配电电缆年平均负荷率一般不超过30%。除此之外，电缆历年的故障情况与敷设环境能间接反映电缆的状态，深圳市常年雨水充足，靠海较近，敷设环境中水分的大量入侵，白蚁、鼠害的侵蚀成为影响电缆运行的重要因素，电缆沟内现实际运行电缆超容，堆叠的情况较为常见，配电电缆与光缆和其他管道等的交错易于造成火灾等环境风险，这些情况也成为评分中不可忽视的内容。综上所述，调整后得到如表1所示的适用于深圳市福田区配电电缆的技术性信息的表格，其中相对于原报告补充修改的问题用粗体标出（表2、表3同）。

原CIGRE报告技术信息总分为23分，其中的运行年限、负荷水平、故障情况和敷设情况的分值分别为3、1、12和7分。据此，本文按照单项总分不变，每项中的单个问题再次分配分数的原则来调整，并根据单个问题对于电缆状态情况影响的重要程度的不同赋予不同的分值，见表1。

由于，运行年限、负荷水平、故障情况和敷设情况这4类所占有的比重也应不同。一般来说运行年限对于电缆绝缘状态的影响最大，故障历史和敷设环境情况间接影响电缆的状态，由于深圳市福田区的配电电缆平均负荷水平一般低于30%，所以负荷对电缆状态的影响相对较小。将运行年限、负荷水平、故障情况和敷设情况按照5∶1∶2∶2的比例进行权重分配。表1中关于运行年限（year）、负荷水平（load）、故障情况（fault）和敷设情况（lay）4类问题的总分分别为year＝3，load＝1，fault＝12，lay＝7。按照5∶1∶2∶2进行调整后技术项的分数应变更为

表1 深圳市福田区配电电缆技术性信息

		A_X	问题	是	否
技术信息	运行年限	1	**此电缆的使用年限为1～5年?**	0.2	0
		2	**此电缆的使用年限为5～10年?**	0.4	0
		3	**此电缆的使用年限为10～20年?**	0.6	0
		4	**此电缆的使用年限为20～30年?**	0.8	0
		5	此电缆的使用年限超过30年?	1	0
	负荷水平	6	**此电缆运行负荷率低于20%?**	0.1	0
		7	**此电缆运行负荷率为20%～30%?**	0.2	0
		8	**此电缆运行负荷率高于30%?**	0.3	0
		9	此电缆在运行中负荷变化幅度较大?	0.4	0
	故障情况	10	**此电缆近5年内发生过故障?**	2	0
		11	**此电缆近6～10年内发生过故障?**	1.5	0
		12	**此电缆近11～20年内发生过故障?**	0.5	0
		13	**此电缆是否仍存在未及时修复的损伤?**	1	0
		14	此电缆的故障发生频率较高?	1.5	0
		15	**此电缆只发生过一种类型的故障?**	0.5	0
		16	**此电缆发生过多种类型的故障?**	1	0
		17	其电缆附件的故障发生频率较高?	1.5	0
		18	**其电缆附件仍存在未及时修复的损伤?**	1	0
		19	**其电缆附件只发生过一种类型的故障?**	0.5	0
		20	**其电缆附件发生过多种类型的故障?**	1	0
	敷设情况	21	此电缆的敷设存在超容的问题?	0.2	0
		22	**此电缆的敷设存在堆叠的问题?**	0.2	0
		23	**此电缆的敷设存在盘圈的问题?**	0.2	0
		24	**此电缆的敷设未按照规定上架?**	0.2	0
		25	**此电缆敷设的电缆沟内支架不完整?**	0.2	0
		26	**此电缆敷设存在转弯大于90°的情况?**	0.4	0
		27	**此电缆敷设存在转弯为60°～90°的情况?**	0.3	0
		28	**此电缆敷设存在转弯为30°～60°的情况?**	0.1	0
		29	**此电缆敷设的电缆沟沟壁不完整?**	0.2	0
		30	**此电缆敷设的电缆沟盖板不平整?**	0.2	0
		31	**此电缆敷设的电缆沟内有低压电缆?**	0.4	0
		32	**此电缆敷设的电缆沟内有过路管道?**	0.4	0
		33	**此电缆附近建筑施工情况很多?**	0.4	0
		34	**此电缆经常发生人为盗窃?**	0.4	0
		35	**此电缆敷设点存在水分侵入地下现象?**	0.4	0
		36	**此电缆敷设与燃气管道、通信电缆相交?**	0.4	0
		37	**此电缆敷设点发生过地基下沉破坏?**	0.4	0
		38	**此电缆发生过白蚁啃食破坏?**	0.4	0
		39	**此电缆敷设点有污水、淤泥和垃圾污染?**	0.4	0
		40	此电缆护套的完整性值得怀疑?	0.4	0
		41	此电缆系统无防水层并处于潮湿环境?	0.4	0
		42	此电缆经常遭受较大机械应力或振动?	0.4	0
得分			$A=(A_1+A_2+\cdots+A_{42})/23$（$0\leqslant A\leqslant 1$）		

$$A=\frac{5\times\frac{year}{3}+1\times\frac{load}{1}+2\times\frac{fault}{12}+2\times\frac{lay}{7}}{10} \quad (1)$$

1.2 对CIGRE TB 358经济性信息的调整

经济上当维护维修费用过高时，更换电缆可能成为较合理的选择；电缆若发生断电后，所造成的损失是否在可承担范围之内，以及可能存在改善线路的经济机遇等成为需要考虑的主要经济因素。另外，由于附件故障占电缆系统故障比重较大，其经济水平是经济信息的评估内容之一，因此进行了补充。经济性的7个问题依据原报告，仍保持总分为7分，每个问题所占权重一致。表2为针对深圳市福田区的电缆的经济性信息，经过评估后的电缆经济项得分B与技术项得分A计算方法不同的是，若更换电缆是最经济的选择，则$B=1$，否则按照常规计算，见表2。

表2 深圳市福田区配电电缆经济性信息

	B_X	问题	是	否
经济信息	1	更换电缆是最经济的选择?	1	0
	2	此电缆系统的运行和维护成本很高?	1	0
	3	此电缆未传送能量的费用很高？（未送达能量造成的处罚和索赔）	1	0
	4	有改善线路的经济机遇?	1	0
	5	**由于附件质量问题而维护更换费用很高?**	1	0
	6	**此电缆可能的维修（包括清洁）费用很高?**	1	0
	7	**若此电缆发生停电，可能的罚金索赔很高?**	1	0
得分		$B=B_1$或$B=(B_2+\cdots+B_7)/6$（$0\leqslant B\leqslant 1$）		

1.3 对CIGRE TB 358策略性信息的调整

国内较为常见的典型策略性调整是对电缆进行改迁、运行条件的调整及难以修复等，主要包括：此电缆运行中是否存在不安全的或者无法使用的风险；针对于重要供电线路的特殊维护；目前维护的人力物力及时间是否在可承受范围之内；以及其他的战略性、政治性的机遇与政策。依据原报告，策略性总分为11分不变，若存在严重的风险时对此电缆状态有严重的影响，故前两个问题的权重分数设置为2分，其余问题依据影响程度的高低主要分为1和0.5两个分数等级。针对策略性方面的内容设置及策略项分数C的计算如表3所示。

表3 深圳市福田区配电电缆策略性信息

	C_X	问题	是	否
策略信息	1	存在严重的不安全风险？（爆炸，失火等）	2	0
	2	存在使电缆无法使用的环境风险?	2	0
	3	这条线路在网络中很重要?	1	0
	4	此种型号电缆已经不可维护和维修?	1	0
	5	**供应商已不再提供技术支持?**	0.5	0
	6	**缺乏对老技术的了解及维护人员匮乏?**	0.5	0
	7	电缆定位和修复的时间超过1个月?	1	0
	8	**电缆定位和修复的时间超过1周?**	0.5	0
	9	此电缆存在战略更新，如电压等级升高?	0.5	0
	10	运行条件改变后（负载要求、电压要求等），电缆、接头和终端不再适合当前应用需要?	1	0
	11	存在线路投资的政治性机遇?	1	0
得分		$C=(C_1+C_2+\cdots+C_{11})/11$（$0\leqslant C\leqslant 1$）		

2 配电电缆的评估案例

使用上述电缆状态评分表格对深圳市福田区的45段10 kV配电电缆进行了评估分析。

2.1 待评电缆线路的选取

对于电缆线路的选取主要包括运行环境较差、投运年限相对较长、近年投运和随机选取的其他线路4类，选取的电缆段为从变电站出线的主电缆段。

2.2 结果分析

最终电缆状态的得分为3项分数的加权平均值，即

$$Y=\frac{(aA+bB+cC)}{(a+b+c)} \quad 0\leqslant Y\leqslant 1 \quad (2)$$

式中，a、b和c分别为技术、经济和策略的权重因子。原报告建议权重因子在1～5之间取值。因为国内技术性指标最重要，策略性指标次之，一般会选择牺牲经济性达到可靠性，故技术、经济和策略权重系数赋值为5、2和3。Y越大说明所存在的技术、经济与策略方面的不良问题越多，也就证明电缆的剩余寿命越短。

计算出45条电缆线路的最终得分，最高为0.65，最低为0.06，典型分数及对应的10段电缆如

表4所示，分数按照降序排列。

表4 调研线路的最终得分与状态分级

等级	线路名称	技术	经济	策略	总分
差	F03香蜜湖一线	0.43	1.00	0.77	0.65
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
中	F11皇都线	0.37	1.00	0.36	0.49
	F47三村线	0.39	1.00	0.27	0.48
	F12国税二线	0.33	1.00	0.36	0.47
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	F25八卦六线	0.24	1.00	0.27	0.40
良	F08大门坊线	0.39	0.50	0.32	0.39
	F23厦供线	0.12	0.67	0.59	0.37
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	F41石中信线	0.21	0.33	0.41	0.30
优	F75华达线	0.28	0.00	0.45	0.28
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	F02银湖二线	0.13	0.00	0.00	0.06
	相关系数r	0.43	0.86	0.65	

简单相关系数可用来描述两个定距变量间联系的紧密程度。简单相关系数一般用r表示，计算公式为

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\bar{X})(Y_i-\bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\bar{X})^i}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Y_i-\bar{Y})^i}} \quad (3)$$

分别计算表4中技术、经济与策略性分数与总分之间的相关系数。经济与总分之间的相关性最高为0.86，策略次之为0.65，技术再次之为0.43。

按照最初筛选线路的不同，将电缆段进行分类，绘制其最终得分与该类电缆序号之间的散点图，如下图所示。可以看到，每一种形状的散点

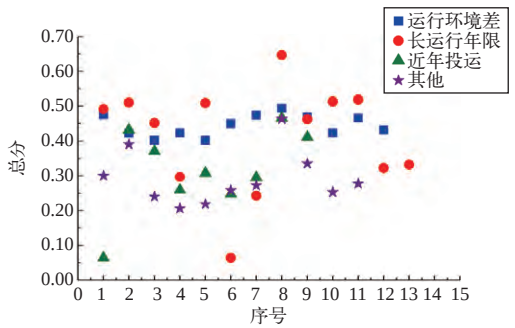

图 45段被调研电缆总分的分布散点图

代表一种类型的电缆线路，长运行年限的电缆段和运行环境较差的电缆段绝缘老化逐渐严重，老化速度增快，使其故障率增高，维护维修的经济损耗增加，最终分数较高。个别偏差较大的点可能是由于部分输入信息的不完整引起的，最终评分结果与资深工程师的经验判断结果基本一致。

CIGRE TB 358将最终得分按照不同分数段进行分级。按照$Y<0.3$（优），$0.3\leqslant Y<0.4$（良），$0.4\leqslant Y<0.5$（中），$Y\geqslant 0.5$（差）的方法将电缆分为优、良、中和差4个状态。深圳市福田区参评的配电电缆段最终优、良、中和差的数目分别为12、9、19和5。电缆的评分分级结果可以作为后续各类检测试验时优先次序安排的参考，可以对差和中状态的电缆优先进行预防性检测，对于优和良状态的电缆可考虑暂缓开展局部放电的现场检测，这样可以有效地优化预防性试验的人力、物力安排。

在预防性试验后，对于运行状态“差”的5段电缆，可以针对引起评分变差的原因，相应地进行电缆、电缆通道或者附属设施的维护维修，使其重新评估后的分数转为中、良或优，若达不到，则应在后续安排中优先考虑更换；对于运行状态为“中”的19段电缆，有条件时，也可以进行相应电缆、电缆通道或者附属设施的维护维修，使其重新评估后的分数转为良或优，并且加大日常收集与评估此类电缆数据的频率。

3 结束语

参照CIGRE TB 358推荐的地下交流电缆剩余寿命的管理方法，提出了调整后的深圳市配电电缆状态评分方法，并对深圳市福田区的45段10 kV配电电缆的主电缆段进行了状态评估。

1）被评估的45段配电电缆段中，运行状态为优、良、中和差的电缆数目分别为12、9、19和5。而运行环境比较差的电缆段和长运行年限的电缆段相应的得分较高，是由于长期运行和较差的运行环境引起的老化加快与严重，相应的故障率增加及经济费用的增加。

2）按照分数段将电缆状态进行分级后，可结

合人力、物力的实际情况指导电缆预防性试验与管理的有序进行。状态为优、良的配电电缆可考虑暂缓局部放电的现场试验。

3）未来将补充对于抽样电缆及附件的解体后的材料分析结果，期望能够进一步验证CIGRE TB 358对于抽样电缆的状态评估的合理性。

参考文献

[1] 深圳福田电缆故障分析报告 [R]. 深圳供电局有限公司，2010.

[2] 深圳福田10 kV配电电缆工单记录 [R]. 深圳供电局有限公司，2015.

[3] Miyashita T. Deterioration of water-immersed polyethyl-ene-coated wire by treeing [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation，1971，6 (3)：129-135.

[4] Crine J P. Electrical，chemical and mechanical processes in water treeing [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation，1998，5 (5)：681-694.

[5] Kitchin D W，Pratt O S. Treeing in polyethylene as a prelude to breakdown [J]. Power Apparatus & Systems Part III Transactions of the American Institute of Electrical Engineers，1958，77 (3)：180-185.

[6] 喻岩珑，李晟，孙辉，等. XLPE电缆绝缘老化与剩余寿命评估的试验方法 [J]. 电网与清洁能源，2011，27 (4)：26-29.

[7] 苏寅生. 电力设备可靠性数据收集统计述评 [J]. 南方电网技术，2015，9 (3)：94-99.

[8] 宫宇，吕金壮. 大数据挖掘分析在电力设备状态评估中的应用 [J]. 南方电网技术，2014，8 (6)：74-77.

[9] CIGRE TB 358 Remaining life managmentof existing AC underground lines [R]. 2008.

（收稿日期：2016－03－09）EA

广告 | AD

Weidmüller

恶劣环境中的可靠电力供应保障

PROtop电源——满足各种应用需求的创新解决方案

魏德米勒PROtop电源应用全新的DCL (输出动态过流)专利技术，具有强大的输出过流能力，能够可靠触发断路开关，驱动大功率电机启动和运行。即使在恶劣的工业环境中，PROtop电源的高可靠性、长使用寿命和高效率等特性都使其成为用户的不二首选，能满足各种技术应用的需求。

魏德米勒电联接(上海)有限公司
电话: 86 21-22195008 网址: www.weidmueller.com.cn

扫一扫，关注魏德米勒官方微信

Let's connect.