高可靠性配电网接线方案综合评价

我国常规的配电网接线模式均为“闭环设计、开环运行”，近几年逐步提出并试运行了闭环配电网，进而引出了开环、闭环之间的优劣比较问题。本文以 RBTS Bus 2 系统构成 4 种高可靠性配电网接线方案，针对供电可靠性、短路电流、供电质量、供电安全、设备利用率和经济性等 6 个方面进行全面、综合的评价，同时考虑分布式电源接入后的差异，为我国高可靠性配电网的改造与建设提供参考依据。

解进军[1] 孟庆海[1] 程林[2] 张鑫[3] 吉平[3] 吴威[4] 田浩[2]/1.北方工业大学电气与控制工程学院 2.清华大学电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室 3.中国电力科学研究院 4.福建省电力公司经济技术研究院

解进军/硕士研究生

关键词/Keywords
配电网；
接线模式；
闭环；
可靠性；
评价；

0 引言

据统计，用户停电事故中，有 80% 以上是由配电系统故障引起的[1]。因此，配电网可靠性水平对整个电力系统的可靠性水平起着决定性作用。

城市是政治、经济的中心，城市供电中断不但会造成巨大的经济损失，而且会影响人民的生活和社会的安定。文献[2]~[4]指出，对于可靠性要求较高的城市区域，建议采用电缆出线、环网接线，并基于经济性和可靠性分析了几种常用的接线模式；文献[5]又进行了几种接线模式的电压质量对比；文献[6][7]针对不同负荷密度，考虑到线损的因素，对不同接线模式进行了分析。以上文献的研究都是基于开环配电网进行的，随着用户对于高可靠与高质量的电力的需求日益攀升，逐步出现了闭环配电网。文献[8][9]提出了配电网的三种闭环方案，并对其可行性进行了研究；短路电流过大是闭环配电网的弊端之一，文献[10]基于短路电流水平对其进行了研究；文献[11]~[13]指出，闭环配电网更适合于分布式电源的接入。常规配电网不具备潮流调节、连续负荷转移能力，为此有学者提出了基于柔性环网控制装置的交直流混合配电网[14][15]，并对其展开了相关研究。

现有的文献研究缺乏关于开环配电网与闭环配电网，并考虑交直流混合配电网的综合差异评价，本文通过供电可靠性、短路电流、供电质量、供电安全、设备利用率和经济性等 6 个方面的对以 RBTS Bus 2 系统构成 4 种高可靠性配电网接线方案进行全面、综合的评价，同时考虑分布式电源接入后的差异，并着重分析了基于柔性环网装置构成的交直流混合闭环配电网的在各方面的表现，为我国高可靠性配电网的改造与建设提供参考依据。

基金项目：国家 863 高技术基金项目（2015AA050102）；国家自然科学基金项目（51177078）。

1 高可靠性配电网接线方案评价因素

（1）供电可靠性

供电可靠性的大小直接地反映了地区电力供应能力的高低。常用的配电网可靠性指标包括：平均供电可用率指标（Average Service Availability Index，ASAI）、系统平均停电频率指标（System Average Interruption

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Frequency Index，SAIFI）和系统平均停电持续时间指标（System Average Interruption Duration Index，SAIDI）。

（2）短路电流

短路是电力系统中的严重故障，且是最常见的故障。2013 年我国发布的《配电网规划设计技术导则》中规定，在 10 kV 系统中，对于 A+、A、B 类供电区域，110 kV 变压器容量在 40 MV • A 以上时的短路电流限定值为 25 kA，容量在 40 MV • A 以下时的短路电流限定值为 20 kA。

（3）供电质量

供电质量包括电压短时中断和电压暂降，目前求取供电可靠性的故障统计中，并没有统计电压短时中断和电压暂降的详细信息，就会出现某些地区的可靠性结果虽然高，但是却无法体现其供电质量。电压短时中断和电压暂降对工业、高新科技企业等用户的安全生产、经济效益有着很大的影响。

（4）供电安全

我国目前采用“ N–1 ”和“ N–1–1 ”准则来衡量电网的供电安全性。我国使用的供电安全标准《DLT 256—2012 城市电网供电安全标准》是根据英国的供电安全标准 EP P2/5 和我国城市电网的实际情况制定的，对“ N–1 ”和“ N–1–1 ”停运情况下的恢复容量和恢复时间都做了具体规定。另外，电磁环网问题也制约着闭环配电网的发展。

（5）设备利用率

考虑到负荷的峰谷变动，保证系统在最大运行方式下可靠地运行，以及满足对未来用电需求的可持续发展、故障时对非故障区域的负荷转移，设备的利用率一般都会留有一定的裕度。设备利用率过低，会增加设备数量，增大成本投入；设备利用率过高，会增加设备损耗，增大设备故障概率，不利于未来负荷增长的规划需求。

（6）经济性

电网的高可靠性与低投资成本是一矛盾体，文献[16]提出了一种可靠性与经济性相协调的配电网规划方法。高可靠性配电网必然会需要更多人力、物力、财力的投入，如何权衡电网可靠性与经济性两者之间的关系，在一定程度上决定着高可靠性配电网的落地实施。

2 高可靠性配电网接线方案

2.1 4 种高可靠性配电网接线方案

本文列举的 4 种高可靠性 10 kV 配电网接线方案如图 1 所示。

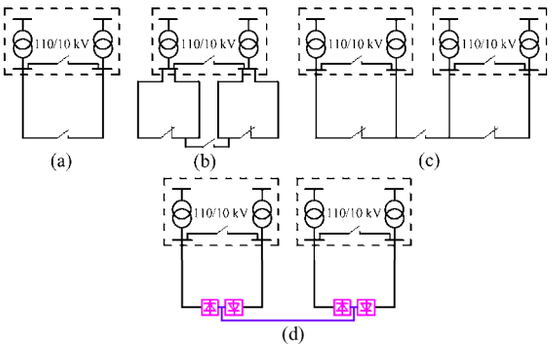

图 1 4 种接线方案

方案 1：单环网，图 1a；

方案 2：同母线出线闭环网，图 1b；

方案 3：不同母线出线闭环网，图 c；

方案 4：基于柔性环网控制装置连接的闭环网，图 1d。

其中，方案 4 是随着柔性直流技术的发展出现的一种新型配电网闭环方式，柔性环网控制装置的结构图如图 2 所示。

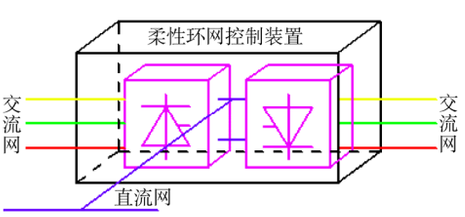

图 2 柔性环网控制装置

装置中的换流器既可以工作在整流模式，也可以工作在逆变模式，其两端接 10 kV 交流线路，直流部分可以作为直流母线，引出直流馈线，供直流负荷的接入和分布式电源的并网。

2.2 算例系统设置

本文采用 RBTS Bus 2 的馈线 F3 与 F4[17][18] 构成不同的接线方案，电缆铺线，负荷支线采用环网柜出线，馈线 F3 与 F4 结构如图 3 所示。

110 kV 变压器采用单台 50 MV • A 单元接线，短路电压百分比 U_k%=10.5；10 kV 线路采用型号为交联聚乙烯绝缘电力电缆 XLPE–630，

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参数如表 1 所示；线路数据、用户数据、设备可靠性数据如表 2、表 3、表 4 所示；联络开关的切换时间为 0.5 h，切换成功率为 0.8；方案 1 的故障隔离时间为 1 h；闭环方案的主干线采用差动保护，故障隔离时间忽略不计；柔性环网控制装置的故障率为 0.127 3 次/台·年，故障修复时间为 10 h/次。

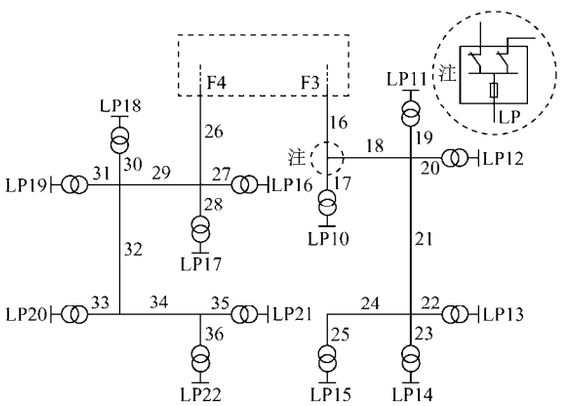

图 3　馈线基本结构图

表 1　线路型号

线路型号	单位电阻/（Ω/km）	单位电抗/（Ω/km）
XLPE–630	0.0393	0.122

表 2　线路数据

RBTS 线路编号	线路长度/km
17，21，25，28，30，34.	0.60
16，19，22，24，27，29，32，35.	0.75
18，20，23，26，31，33，36.	0.80

表 3　用户数据

RBTS 负荷点编号	用户数/（户/LP）	平均负荷/（MW/LP）	峰负荷/（MW/LP）
LP13，LP14，LP20，LP21.	1	0.566	0.9167
LP15，LP16，LP22.	10	0.454	0.7500
LP12，LP17，LP18，LP19.	200	0.450	0.7291
LP10，LP11.	210	0.535	0.8668

表 4　可靠性参数

设备名称	单位故障率	修复时间
10 kV 母线	0.001 次/段·年	2 h/次
断路器	0.006 次/台·年	4 h/次
配电线路	0.065 次/km·年	5 h/次
用户变压器	0.015 次/台·年	10 h/次

2.3 综合评价结果

（1）供电可靠性

供电可靠性是最能衡量系统向用户提供电能能力的衡量标准之一。采用最小割集法对 4 种方案的供电可靠性进行计算，结果如表 5 所示。

表 5　可靠性结果

方案	SAIDI/ h/（户·年）	SAIFI/ 次/（户·年）	ASAI/（%）
1	0.6559	0.2119	99.992512
2	0.3848	0.0849	99.995607
3	0.3831	0.0841	99.995627
4	0.3880	0.0882	99.995508

采用开环运行的方案 1 供电可靠性最低，如果提升设备自动化水平，其供电可靠性接近闭环方案：当故障隔离时间为 0.2 h，联络开关的切换时间为 0.1 h、切换成功率为 0.96 h，该方案的供电可靠性将提升至 99.995%，但自动化水平的提高总是伴随一次成本的投入，同时也受到技术水平的制约。

在闭环方案 2、3、4 中，配合主干线差动保护，可以实现主干线一阶故障的及时切除。方案 2 中不可避免的是变压器故障后母联开关的切换所带来的短时停电影响，方案 3 减少了母联开关的操作。方案 2、3 中环与环之间引入联络线，消除了部分二阶停电故障。

方案 4 中，配电网采用柔性环网控制装置进行闭环，并通过直流线路进行了多条馈线的柔性连接。柔性环网控制装置结构复杂，考虑到其自身的不可靠与修复时间偏长，导致该方案的 SAIDI、SAIFI 相比于其他闭环方案略微增加、ASAI 略微降低。

（2）短路电流

取短路电流最大的负荷点，即靠近电源的负荷点。以 LP10 和 LP16 为例，4 种方案短路电流如表 6 所示。

表 6　短路电流

方案	LP10 短路电流/kA	LP16 短路电流/kA
1	15.4	14.5
2	15.9	15.0
3	21.8	20.8
4	15.4	14.5

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

方案 1、2 的短路电流均满足规定的<25 kA 的要求：对于开环运行的方案 1 来说，LP10 的短路电流由单电源单线路提供；而对于闭环运行的方案 2 来说，LP10 的短路电流由单电源双线路并联提供。

方案 3 的短路电流虽满足规定的<25 kA 的要求，但在某些情况下极有可能越限。该方案的短路电流明显高于其他方案，是因为 LP10 的短路电流由双电源双线路共同提供。闭环运行并不会导致主干线路最大短路电流出线明显变化，但是会导致短路电流流经更多的线路以及电力设备[19]。而对于环上的负荷引出支线，如 LP10 的支线 17 及所连接的用户变压器，其短路电流会大大超过开环运行，需要更换耐流能力更大的设备。

方案 4 的短路电流与方案 1 相同，原因在于柔性环网控制装置采用定电流控制，当一侧发生短路故障时，另一侧不会提供短路电流。该方案解决了传统闭环配电网短路电流过大的弊端，使得原有电网中的设备仍然适用。

（3）供电质量

电能长时间中断供应，即故障所带来的停电影响，可以从供电可靠性指标中体现。但是关于电压短时中断和电压暂降的供电质量问题，在供电可靠性指标中却无法体现。

对于方案 1，其开环结构特性势必会带来较为频繁的电压短时中断和电压暂降；方案 2 采用闭环结构，减少电压短时中断和电压暂降的发生，但是母线和变压器的不可靠也影响供电质量；方案 3 环上负荷正常运行时有两个电源同时供电，实现了功率的动态支持，提升了供电质量。方案 4 采用柔性环网控制装置进行闭环连接，其控制电路工作在高频状态下，可以动态跟踪电网运行状态、控制功率交换，进一步提升供电质量。

（4）供电安全

不考虑上级电网拓扑结构，只对 10 kV 配电网线路进行“ N–1 ”和“ N–1–1 ”准则判定，判定结果如表 7 所示：

方案 1 满足“ N–1 ”，但是供电恢复时间依赖于联络开关的动作时间。方案 2、3 满足“ N–1 ”和“ N–1–1 ”，如果“ N–1–1 ”事件发生在同一环网上，则供电恢复时间依赖于联络开关的动作时间；如果发生在不同环网上，则可以做到无断电转移负荷。方案 4 满足“ N–1 ”和“ N–1–1 ”，无论“ N–1–1 ”事件发生在同一环网上还是不同环网上，都可以做到无断电转移负荷。

表 7 供电安全性

方案	是否满足“ N–1 ”	是否满足“ N–1–1 ”
1	√	×
2	√	√
3	√	√
4	√	√

方案 1、2 不存在电磁环网，方案 3 如果上级 110 kV 线路连接，则形成电磁环网，对系统的安全稳定有一定的影响。方案 4 采用柔性环网控制装置进行闭环，同时对电磁环网进行了解环：当高压线路开断后引起功率经低压侧转移时，柔性环网控制装置能够控制功率传送容量大小，或将其关断；电磁环网中的无功环流会产生一定的有功损耗[20]，而柔性环网控制装置中存在直流部分，因此不能够传递无功功率，故不存在无功环流。

（5）设备利用率

合理的变压器利用率与线路利用率可以保障负荷转移，满足负荷增长需求。四种方案的最大变压器利用率与最大线路利用率如表 8 所示。

表 8 设备利用率

方案	最大变压器利用率	最大线路利用率
1	50%	50%
2	50%	75%
3	75%	75%
4	75%	75%

方案 1、2 的最大变压器利用率为 50%，确保其他单台变压器故障时负荷的全部转移；方案 3 的最大变压器利用率可达 75%。方案 1 中，为确保线路故障时的负荷转移，最大线路利用率最高为 50%；对于方案 2、3，环与环之间可以进行负荷转供，最大线路利用率可达 75%。

方案 4 采用柔性环网控制装置实现了 4 条线路的柔性连接，最大变压器和线路利用率达到 75%。采用柔性环网控制装置可以实现多条线路的柔性连接，提高变压器和线路利用率。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

（6）经济性

假定某地区用户数为 1 254×2 户，由两组环网供电，不计变电站建设费用，该地区四种接线方案的建设费用与每年的停电损失费用如图 4、5 所示。

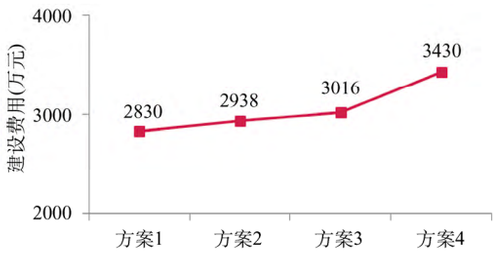

图 4　建设费用

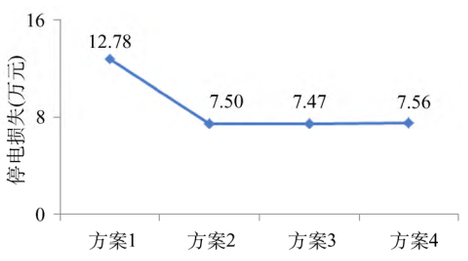

图 5　停电损失

4 种方案的建设费用中，电缆费用占总成本的 80%左右。方案 2 建设费用增加的主要原因是纵联差动保护装置的更换；方案 3 建设费用增加的主要原因是纵联差动保护装置的更换、用户侧大短路容量变压器的更换；方案 4 建设费用增加的主要原因是纵联差动保护装置的更换、柔性环网控制装置的使用。4 种方案的停电损失费用均较低，基于一定自动化、开环运行的方案 1 每年的停电损失最大，闭环运行的方案 2、3、4 减少了每年的停电损失。

2.4 考虑分布式电源接入情况

分布式电源接入电网是未来电力发展的趋势。《配电网规划设计技术导则》中规定，对于容量为 400 kW～6 MW 的分布式电源，宜采用专线并入 10 kV 电网。分布式电源接入配电网，将会改变短路电流大小，改变电网功率流向，并会伴随着孤岛的出现，对电网的安全性有一定的影响[22]。

对于方案 1，分布式电源的接入必将改变其辐射状结构和功率流向，这将对各种继电保护装置产生一定的影响。闭环配电网潮流具有双向性，分布式电源的接入不会改变其特点，原有的保护依然适应，因此方案 2、3、4 更适合分布式电源的接入。

另外，孤岛是引入分布式电源后不可避免的运行方式。孤岛脱离了管理部门的监控，电能质量、用户或维修人员的人身安全无法得到保证，且孤岛黑启动策略复杂[22]，应尽量避免孤岛的出现，方案 2、3、4 产生孤岛的概率远远低于方案 1。

3　结束语

高可靠性配电网接线方案适用于对供电可靠性要求较高、负荷较为密集的城市地区。现代城市电网更看重的是电力网络不间断供应电力的能力，尽量选择供电可靠性较高的接线模式。

1）采用一定自动化水平的开环配电网与闭环配电网具有较高的供电可靠性；

2）不同地区应按照各自的用电需求，考虑不同接线模式在短路电流、供电质量、供电安全、设备利用率等方面的差异，选取适宜的接线模式；

3）高可靠性配电网得以落地实施的决定性条件是其经济性，必须合理权衡电网投资成本与停电损失之间的关系，才能保证电网收益；

4）基于柔性环网控制装置的闭环配电网投资成本大，但在其他方面表现优异，能够为我国闭环配电网的改造与建设提供一定的参考性。

参考文献

[1] Billinton，P．Wang．Reliability-network-equivalent approach to distribution-system-re1iability evaluation [J]．IEE Proc．Gener．Trans．Distrib，1998,145(2)：149-153．

[2] 宋云亭，张东霞，吴俊玲，等．国内外城市配电网供电可靠性对比分析[J]．电网技术，2008，32（23）：13-18．

[3] 王成山，王赛一，葛少云，等．中压配电网不同接线模式经济性和可靠性分析[J]．电力系统自动化，2002，26（24）：34-39．

[4] 谢莹华，王成山，葛少云，等．城市配电网接线模式经济性和可靠性分析[J]．电力自动化设备，2005，25（7）：12-16．

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[5] 谢晓文，刘洪．中压配电网接线模式综合比[J]．电力系统及其自动化学报，2009，21（4）：94-99．
[6] 姚福生，杨江，王天华．中压配电网不同接线模式下的供电能力[J]．电网技术，2008，32（S2）：93-95．
[7] 陈庭记，程浩忠，何明，等．城市中压配电网接线模式研究[J]．电网技术，2000，24（9）：35-38．
[8] W．T．Huang，T．H．Chen，G．C．Pu，et al．Assessment of upgrading existing primary feeders from radial to normally closed loop arrangement[J]．IEEE/PES，Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002：Asia Pacific，2002（3）:2 123-2 128．
[9] Tsai-Hsiang Chen，Wei-Tzer Huang，Jyh-Cherng Gu，et al．Feasibility study of upgrading primary feeders from radial and open-loop to normally closed-loop arrangement[J]．IEEE Transaction on Power Systems．2004（19）：1308-1316．
[10] 吴振辉，彭晓涛，沈阳武，等．一种配电网环型供电模型及其合环运行方式的研究[J]．中国电机工程学报，2013，33（10），57-63．
[11] 张项安，张新昌，李卫星，等．基于差动保护的配电网闭环运行方式探讨[J]．电力系统保护与控制，2013，41（3）：102-106．
[12] 牟龙华，陆健，张鑫．闭环微电网快速接地保护实用化方案[J]．电力系统保护与控制，2012，36（10）：39-44．
[13] Viawan A，Karlsson D．Industry applications various protection schemes for closed loop feeders with synchronous machine based distributed generation and their impacts on reliability[C] Proceedings of 2007 IEEE Powertech Conference．Lausanne，Switzerland．July 2007：1170-1175．
[14] Naotaka Okada，Hiromu Kobayashi，Tadao Ishikawa，et al．Simulation of Isolated Operation in Fault Condition by Loop Power Flow Controller [J]．Control Engineering Practice，2005，13：1537-1543．
[15] Naotaka Okada．Verification of Control Method for a Loop Distribution System Using Loop Power Flow Controller[C]．IEEE Power Systems Conference and Exposition，2006，11，2116-2123．
[16] 程林，焦岗，田浩．可靠性与经济性相协调的配电网规划方法[J]．电网技术，2010，34（11）：106-110．
[17] Allan R N，Billinton R A，Sjarief I．Reliability test system for educational purposes：Basic distribution-system data and results[J]．IEEE Trans．on Power Systems，1991（6）：813-820．
[18] Roy Billinton，Satish Jonnavithula．A Test System For Teaching Overall Power System Reliability Assessment [J]．IEEE Trans．on Power Systems，1996（11）：1670-1676．
[19] 黄伟军，钱远驰，吕志来．闭环运行方式城市配电网接线模式的研究[J]．电力系统保护与控制，2013，41（24）：123-127．
[20] 程林，刘文颖，王维州，等．电磁环网中无功环流的分析与控制[J]．电网技术，2007，31（8）：63-67．
[21] 李斌，于绚，薄志谦，等．含分布式电源的闭环配电网保护方案[J]．电力系统自动化，2010，34（7）：80-84．
[22] 孟强，牟龙华，许旭锋，等．孤立微电网的黑启动策略[J]．电力自动化设备，2014，34（3）：59-64．

———————

作者简介
解进军（1990-），男，硕士研究生，研究方向为电力系统可靠性分析。
孟庆海（1971-），男，教授，研究方向为电气安全。
程　林（1973-），男，副教授，研究方向为电力系统可靠性分析、电力系统稳定性分析与控制。
张　鑫（1981-），男，高级工程师，研究方向为电力系统可靠性分析、电力系统电压稳定性分析。
吉　平（1983-），女，工程师，研究方向为新能源规划、电力系统稳定与控制。

（收稿日期：2015-12-10）EA
（编辑：朱金凤）

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net