

「配电网」

# 考虑电力市场下差异化可靠性需求的配网典型接线方式

文/广东电网有限责任公司中山供电局 冼浩欣 李京平 蔡志平  
广州市奔流电力科技有限公司 羿应棋 张诗建 高崇杰

我国现有配电网结构能否适应未来电力市场发展仍有待探究，售电侧改革促使配电网为适应电力市场下的可靠性需求而做出相应改变。对我国现有配电网典型接线方式进行了细致分析，总结了各类接线方式的特点及适用范围；通过对现有典型接线方式的可靠性计算，评估其在电力市场下的适用情况，判断其是否能够满足电力市场下的可靠性要求；对国外典型接线方式进行分析讨论，为我国配电网未来发展提供借鉴；最后，结合国内外情况，提出提高网架结构可靠性、适应市场差异化可靠性需求的几类措施，为我国配电网适应市场化需求提供指导方向。

随着电力体制改革的不断推进，中国电力工业逐渐趋向于市场化。售电侧的改革让用户拥有了自主选择的权利，有权向供电公司提出更高的要求，以此保障自身用电的安全性和可靠性。价格是市场最核心的功能，在电力生产到消费这一环环相扣的价值链中，电力市场能够捕捉到不同时间、不同空间、不同环节的价值波动，并将之以价格的形式表示出来。用户对供电质量、供电可靠性需求的不同，必然导致电能价格的差异，用户可根据自身需求的不同以及市场电能价格的差异，向供电企业提出适合自己的电能质量和可靠性要求，而供电企业的任务则是在市场的导向下满足用户差异化的可靠性需求。

电力市场下不同的用户对供电可靠性要求不同，愿意为供电质量支付的费用也存在差异；而不同的供电公司所能提供以及保证的电能质量不同，因此所需费用也各不相同。用户在市场上可以根据自身所需对可靠性提出要求，对可靠性水平要求较高的用户支付较高的费用，而选择低

可靠性水平的用户所需支付费用较少，以此实现“按质论价，高质高价”。

为满足电力市场下用户不同的可靠性需求，新一轮电力体制改革对现有的典型接线方式提出了新的挑战。目前，我国配电网接线方式仍然十分混乱，虽然国家在这方面对配电网有一些规定，但由于规定比较粗糙，各省市的实施情况并不理想，仅仅是在出现重要负荷时，加装配电自动化设备来提高用户供电可靠性，而没有在根本上对其不合理的网架结构进行整改。长此以往，随着负荷的增多，势必导致网架结构紊乱，用户供电可靠性难以得到保证，最终制约配电网的进一步发展，并且，在电力市场下国内现有的配电网典型接线方式是否能够满足用户需求仍是一个有待考究的问题。顺应本次电改，对国内配电网接线进行全面整改，兼顾配电网现状及其远景需要，为配电网的长远发展创造有利的条件。

在未来的电力市场中，用户对配电商和供电

服务拥有自主选择权。针对上述问题,在电力市场环境分析下中压配电网典型接线方式,对不同运行方式下接线模式的可靠性进行探究;在经济性方面,不同的投资成本对应着不同的可靠性需求;最后综合考虑可靠性与经济性,根据用户差异化可靠性需求,给出推荐的接线方式。

## 电力市场下的可靠性需求

电力市场下用户的差异化可靠性需求主要体现在不同的供电区域上。由《2016配电网规划设计技术导则》可知,电力市场下的可靠性需求如表1所示。

表1 各类供电区域可靠性需求

| 供电区域 | 供电可靠率 (RS-1)                  |
|------|-------------------------------|
| A+   | 用户年平均停电时间不高于5 min (≥99.999%)  |
| A    | 用户年平均停电时间不高于52 min (≥99.990%) |
| B    | 用户年平均停电时间不高于3 h (≥99.965%)    |
| C    | 用户年平均停电时间不高于12 h (≥99.863%)   |
| D    | 用户年平均停电时间不高于24 h (≥99.726%)   |
| E    | 不低于向社会承诺的指标                   |

注:1.RS-1计及故障停电、预安排停电及系统电源不足限电影响。

2.用户年平均停电次数应结合历史数据与用户可接受水平制订。

此外,同一线路的不同用户可靠性需求也存在差异。在市场环境下,考虑到用户的差异化可靠性需求,尤其是个别用户高可靠性服务要求,电网公司需要购买额外备用,以提高同一线路中个别用户的可靠性。并且,不同售电公司所提供的可靠性服务亦有差别,用户有权选择不同的售电公司,选择适合自己的可靠性服务。

网架结构的好坏决定了配电网整体可靠性所能达到的水平。提高供电可靠性,不能仅仅局限于提高某一特殊节点的可靠性,而是要从电网不断发展的角度来逐步提高用户整体可靠性水平,满足用户日益增长的可靠性需求。

现阶段国内配电网接线仍然存在诸多问题,在电力市场下现有的典型接线能否满足用户可靠性需求和未来发展仍有待探究,必须对配电网存在的不合理接线进行全面整改并规划未来发展方向。只有良好的网架结构、具有发展空间且适应市场需求的接线方式,才能满足用户日益增长的可靠性需求,提高配电网整体可靠性水平。

## 配电网可靠性评价方法

售电侧改革逐步推进,电能销售逐步市场化,典型接线方式能否适应新形势下的可靠性要求仍是一个需要探究的问题。目前,国内配电系统一般选用环网接线,开环运行,辐射式供电的运行方式。通常情况下运用故障模式与后果分析法(Failure Mode and Effects Analysis, FMEA)对辐射式配电网可靠性进行评估。该方法拥有思路清晰、原理简单、模型精确等优点。FMEA方法将配电网各元件分为正常和故障两种状态,接着枚举各元件状态,列举出所有可能的状态,判断系统在各状态下的供电连续性,得出其故障状态的集合,然后根据此集合,求出各可靠性指标。

假设各元件的故障相互独立且元件间彼此串联,则平均故障率、平均停运持续时间以及年平均停运时间3个可靠性参数的计算式分别为

$$\lambda_s = \sum_i \lambda_i \quad (1)$$

$$r_s = \frac{t_s}{\lambda_s} = \frac{\sum_i \lambda_i r_i}{\sum_i \lambda_i} \quad (2)$$

$$t_s = \sum_i \lambda_i r_i \quad (3)$$

式中, $\lambda_i$ 为元件*i*的平均故障率; $r_i$ 为元件*i*的平均故障停电时间。此外,进行可靠性计算时, $\lambda$ , $r$ , $t$ 所使用的量纲必须一致, $\lambda$ 为次/年, $r$ 为h/次, $t$ 为h/年。

平均故障率、平均停运时间和年平均停运时间这3个指标并不总能完全表征系统可靠性。为了反应系统可靠性和故障的严重程度,一般采用平均供电可用率指标(ASAI)进行评估。

$$ASAI = \frac{\text{用户用电小时数}}{\text{用户需电小时数}} = \frac{N_{\text{总}} \times 8760 - \sum t_{si} N_i}{N_{\text{总}} \times 8760} \quad (4)$$

式中, $N_{\text{总}}$ 为系统总用户数; $N_i$ 为故障时受影响的用户数, $t_{si}$ 为与其相对应负荷的年平均停运时间;8 760为1年的小时数。

## 国内典型配网接线方式可靠性评价

现以国内典型网架为例对配网接线方式进行定量分析,研究不同接线方式对可靠性指标的影响。基于国家电力监管委员会可靠性管理中心2010年度公布的数据,假设线路参数如表2所示,

表2 线路参数

| 供电区域 | 架空故障率/km | 电缆故障率/km | 变压器故障率/台 | 平均修复时间/h | 倒闸时间/h |
|------|----------|----------|----------|----------|--------|
| A+、A | 0.11     | 0.02     | 0.003    | 3        | 2      |
| B、C  | 0.11     | 0.02     | 0.003    | 4        | 2      |
| D、E  | 0.11     | 0.02     | 0.003    | 6        | 2      |
| 农网   | 0.11     | 0.02     | 0.003    | 8        | 2      |

线路按负荷均匀分成3段,有12台变压器,在线路负荷均匀分布且负载率合格的情况下,各类接线方式可靠性计算结果如表3所示。

以上为我国现阶段应用最为广泛的接线方式。对比表1可知,并非所有接线方式都能满足电力市场下的可靠性要求。下面对以上各接线方式的特点及其在电力市场下的适用范围逐一进行讨论分析,并额外讨论双环网和花瓣形这两种具有极高可靠性,但我国现阶段还未采用或采用较少的接线方式。

#### 1. 单辐射

单辐射接线方式仅有单电源供电,其优点是接线简单,新增负荷方便,投资省,线路利用率高,每条出线均可满载运行。缺点是供电可靠性低,故障影响范围大,若线路首端或电源发生故障将导致全线停电。

由表3可知,单辐射接线方式在线路长度为

15 km的情况下能保证99.884 5%的供电可靠性,满足电力市场下对D和E类供电区域99.726%的供电可靠性要求。而农网因其较长的故障修复时间,可靠性略有下降,在线长为15 km时可靠性为99.846 0%,同样可达标准。根据电力市场用户对可靠性要求的不同及其较低的投资和运维成本,可将该接线方式用于负荷密度较低的郊区或农村地区。

#### 2. 单环网

单环网接线方式为环网线路中最基本的接线形式,其线路两端电源既可来自同一变电站,也可来自不同变电站,主干线负载率不能超过50%,满足 $N-1$ 安全准则。

由表3可知,单环网接线方式在线路长度为15 km的情况下能保证99.935 8%的供电可靠性,完全可以满足电力市场下对D和E类地区的供电可靠性要求,对B、C类供电区域的可靠性亦能达

表3 各类接线方式可靠性结果

| 接线方式     | 转供类型 | 供电区域 | 负荷密度/(MW·km <sup>-2</sup> ) | 线长/km | 架空可靠性(%) | 电缆可靠性(%) |
|----------|------|------|-----------------------------|-------|----------|----------|
| 单辐射      | 无联络  | 农网   | 0.1                         | 5     | 99.946 4 | \        |
|          |      |      | 0.1                         | 10    | 99.896 2 | \        |
|          |      |      | 0.1                         | 15    | 99.846 0 | \        |
|          |      | D、E  | 1                           | 5     | 99.959 8 | \        |
|          |      |      | 1                           | 10    | 99.922 1 | \        |
|          |      |      | 1                           | 15    | 99.884 5 | \        |
| 单环网、n供一备 | 单联络  | D、E  | 1                           | 3     | 99.986 1 | \        |
|          |      |      | 1                           | 5     | 99.977 7 | \        |
|          |      |      | 1                           | 10    | 99.956 8 | \        |
|          |      | B、C  | 1                           | 15    | 99.935 8 | \        |
|          |      |      | 6                           | 3     | 99.988 9 | 99.997 1 |
|          |      |      | 15                          | 3     | 99.990 3 | 99.997 4 |
|          |      | A+、A | 30                          | 3     | 99.990 3 | 99.997 4 |
|          |      |      | 1                           | 3     | 99.986 1 | \        |
|          |      |      | 1                           | 5     | 99.977 7 | \        |
| 多分段多联络   | 多联络  | D、E  | 1                           | 10    | 99.956 8 | \        |
|          |      |      | 1                           | 15    | 99.935 8 | \        |
|          |      |      | 1                           | 3     | 99.986 1 | \        |
|          |      | B、C  | 1                           | 5     | 99.977 7 | \        |
|          |      |      | 1                           | 10    | 99.956 8 | \        |
|          |      |      | 1                           | 15    | 99.935 8 | \        |
|          |      | A+、A | 6                           | 3     | 99.988 9 | 99.997 1 |
|          |      |      | 15                          | 3     | 99.990 3 | 99.997 4 |
|          |      |      | 30                          | 3     | 99.990 3 | 99.997 4 |

标。而且, 线长3 km时其供电可靠性能满足A类供电区域99.990%的可靠性要求。但即使是采用高可靠性的电缆线路, 距离A+类区域5个9的可靠性要求还有一段距离。

在电力市场中, 这种接线方式适用于供电可靠性要求较高的城市地区, 或者初期建设阶段的繁华地区以及对供电可靠性有一定要求的用户。

### 3. $n$ 供一备

$n$ 供一备接线模式随着 $n$ 值的不同其接线灵活度和可靠性程度以及线路平均负载率都会随之变化。通常, 使用较多的是接线方式比较理想的两供一备和三供一备, 线路平均负载率为67%和75%。

$n$ 供一备与单环网同属于单联络网架结构, 在负载率合格的情况下, 两者可靠性相同, 可以满足B类供电区域的可靠性要求, 并且在线路长度较短时能够满足A类供电区域的要求。

相比较于单环网, 该接线方式在相同的可靠性下能够承担更高的负载率。在电力市场中, 可根据大型商业或工业用户的可靠性要求, 增加备用, 保证其供电可靠性。

### 4. 多分段多联络

多分段多联络接线方式主要运用于架空线路, 一般采用分段开关将主干线分为2~3段并设置2~3个联络开关, 并且分段数越多, 故障检修时间越短, 网络可靠性越高。

由表3可知, 多分段多联络接线方式与单联络网架相比, 在负载率合格且能完全转供时具有相同的可靠性, 但多分段多联络接线方式在应对故障时具有更强的适应性, 在发生多重故障时较之单联络网架具有更高的可靠性。

在电力市场下, 多分段多联络接线方式多用于负荷密集, 用户对供电可靠性要求较高的城市配网地区。网络的可靠性随着分段开关数量的增加而增加, 但随之而来的是昂贵的投资费用。应根据用户的可靠性需求和当地实际情况, 选择合适的分段数以及恰当的分段点和联络点, 保证供电可靠性和投资经济性, 取得较好的投资收益。

### 5. 双环网

双环网分为两个独立单环形式和开关站形式。两个独立单环形式接线模式由两个独立的单环网构成, 可满足 $N-1$ 安全准则, 线路负载率为50%。在电力市场中, 根据用户需求, 此模式提

供的双电源可满足中小型用户对可靠性提出的较高要求, 保证供电的可靠性。

较之于由两个独立单环组成的双环网, 开关站型双环网能显著提高线路负载率, 理论运行负载率最高可达75%。随着城市建设的不断发展, 部分地区的负荷密度逐年增大, 当负荷密度临近临界点时, 可在原有环网的基础上寻找适合的开关站, 在两个环网间添加联络线来提高线路负载率, 以适应不断增长的负荷数量和可靠性需求。

相对于单环网, 开关站式双环网接线方式在可靠性方面会进一步提升, 采用电缆线路的双环网接线, 其可靠性预估可接近A+类供电区域要求, 加装自动化设备后, 可满足市场化后重要用户对可靠性的苛刻要求。

开关站式双环网接线适用于可靠性要求极高的城市核心区域, 该部分地区负荷密集, 停电造成的经济损失极大。为满足重要用户对可靠性的苛刻要求, 应选择开关站式双环网作为该地区的配网接线方式。

### 6. 花瓣形接线

花瓣形接线(仅适用于20 kV)以变电站为中心, 由一个变电站的一段母线引出的一条出线环接多个配电站后, 再回到本站的另一条母线, 由此构成一个“花瓣”。不同电源变电站的每2个环网中间又互相联络, 组成花瓣式相切的形状。

该接线方式正常运行时2台变压器提供的2个电源并列运行, 满足主变压器“ $N-1$ ”。不同电源变电站的花瓣间设置联络开关, 线路负载率控制在50%以内, 满足线路“ $N-1$ ”。供电环正常情况下闭环运行, 2个开关点之间采用纵联差动保护, 在环网段间任一点出现故障, 其他用户都不会发生断电的情况, 只有故障点才会暂时停电。花瓣形接线方式供电可靠性高, 可满足“ $N-1$ ”和“ $N-2$ ”安全准则。

与上述所有接线方式相比, 花瓣形接线预估会有最高的可靠性, 能够满足电力市场下对A+类供电区域99.999%的可靠性要求, 加装自动化设备后, 还可进一步提高供电可靠性, 对核心区域苛刻的可靠性要求具有极强的适应性。

在电力市场中, 高负荷密度的区域对供电可靠性也会提出很高的要求, 传统配网接线方式早已不能满足用户对可靠性的需求。虽然投资较高, 但对

于高负荷密度和高供电可靠性需求的大型城市核心区域,花瓣形接线不失为一种好的选择。

## 国外典型配网接线方式评价

国外中压配网接线方式种类繁多且各具特色,有许多典型的接线方式值得我国借鉴,如北美的 $4 \times 6$ 网络接线、法国的手拉手接线、日本的多分段多联络、新加坡的梅花状闭环网等接线模式。

北美典型接线以 $4 \times 6$ 网络接线为例,如图1所示,该接线方式的变压器的负荷侧称为一个节点,每个节点侧均有3条馈线与另外3个节点相连,4个节点通过6条馈线互联,组成 $4 \times 6$ 网络,在北美高负荷密度地区广泛使用, $4 \times 6$ 网络接线的任何两个电源点间都存在联络或可转供通道。其特点主要有以下3点。

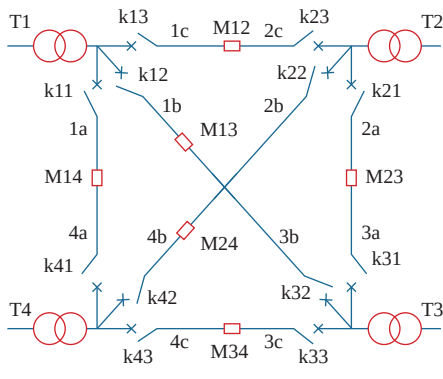


图1 北美 $4 \times 6$ 接线模式

1) 整个网络正常运行时是4个独立的开环配电系统,由1个电源和3条辐射状馈线组成。发生事故时,最坏的情况也只会影响某一电源的供电。

2) 当任一电源因故退出运行时,所接负荷可通过联络开关转移至其他3个电源,使每个电源的负载近似上升 $1/3$ 。

3) 灵活性好。网络扩展灵活,多种接线方式均可方便地扩展为 $4 \times 6$ 网络接线;运行方式灵活,根据负荷的发展,可通过改变联络开关选择灵活地改变负荷分布,负载率不超过75%时可满足网络“ $N-1$ ”要求,当负载率不大于50%时可满足网络“ $N-2$ ”要求。

法国的典型接线模式为手拉手接线,与我国架空线的手拉手接线模式相仿,但不同之处在于法国的手拉手接线方式在城市配电网中有两种不同的接线结构,分别适用于负荷密度不同的区

域。第一种是适用于城市中心区域的双环网手拉手接线,如图2所示,该接线方式采用变电站间双环网,配变双T接入,极大地保证了供电的可靠性;第二种接线方式如图3所示,采用变电站间单环网,配变开断接入,与第一种接线方式相比供电可靠性较低,适用于城市负荷密度较小的非核心区域以及郊区区域。

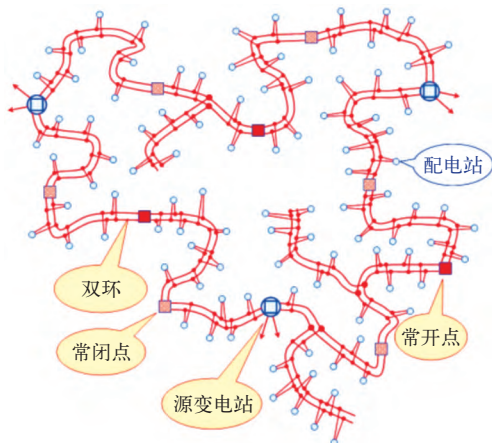


图2 法国变电站间双环网接线方式

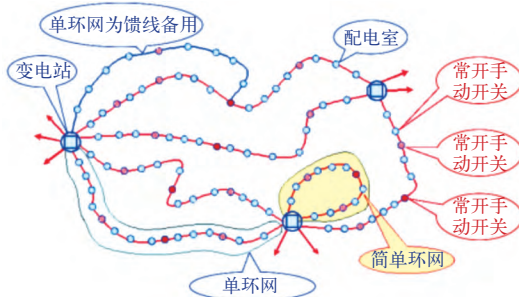


图3 法国变电站间单环网接线方式

日本配电网主要采用多分段多联络接线方式,与我国所采用的多分段多联络接线方式类似,不同在于其主干线分段数以及馈线联络数普遍多于我国,发生故障后能更准确切除故障点,恢复供电,在保证更高可靠性的同时,接线方式更为复杂,转供电方式更为灵活。

新加坡的梅花状闭环网接线模型如图4所示,

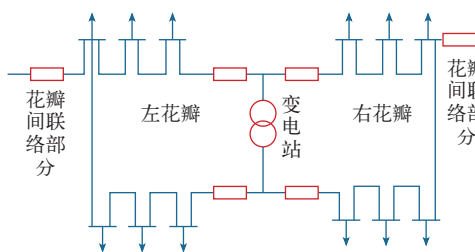


图4 新加坡梅花状闭环网接线

通过变电站两回22 kV馈线构成环网，形成花瓣结构。该接线方式在不同变电站的两个环网间相互连接，组成花瓣式相切的形状，其网络接线实际上是由变电站间单联络和变电站内单联络组合而成，站间联络部分开环运行，站内联络部分闭环运行，重要负荷设在两个环网的联络点附近，保证重要负荷的供电可靠性。我国广州知识城地区所建设的花瓣形配电网，就是借鉴新加坡这一典型配电网接线方式。

## 配电网现有问题及可靠性提升措施

从国内配电网典型接线的可靠性评价结果可以发现，我国虽然在保证A+类区域供电可靠性要求上有所欠缺，但现阶段普遍采用的辐射型、单联络以及多联络网架结构已经能够满足A类及以下地区的可靠性需求，然而实际情况并不理想。本文的可靠性计算是基于线路负载率合格、联络线路之间可完全转供条件下的研究，但在实际运行中，由于规划的不足，线路负载率往往不符合标准，对电力负荷的转供造成严重影响，因而极大地降低了配网的可靠性。此外，受限于设备的维护管理水平以及相对滞后的设备更新速度，我国相对落后地区的配电网，尤其是农网，可靠性远远达不到标准，对电力市场下的配电网发展造成极大的阻碍。

随着电力市场的发展，可靠性需求势必逐年增加，而传统网架结构仍有着许多提升的空间，解决配电网存在的问题，提高可靠性并适应电力市场下的差异化可靠性需求是配电网进一步发展的关键。此外，法国的双环网以及新加坡的花瓣形接线也为解决我国A+类区域供电可靠性的不足提供了新思路。以下结合国内外情况，提出电力市场下配电网接线可靠性提升措施。

1) 完善配电网结构规划。考虑配电网结构时，包括变电站的选点、规模和线路布局以及当地负荷水平，并结合用户可靠性需求以及未来发展趋

势，选择适合当地持续发展的网架结构。此外，根据城市发展的总体趋势以及产业结构布局，选择合理的走线，有效控制线路负载，提高区域网架的整体可靠性。

2) 提高线路配置。对于可靠性要求高的线路，可以加装自动化设备。当配网发生故障时，可以迅速定位故障并将其切除，恢复非故障线路供电，减少故障停电范围；配网正常运行时，可以实现对线路开关状态以及电压电流的远程监控。此外，还可以对线路进行最优分段，并配合自动化设备，进一步提高线路的可靠性水平。

3) 加强管理和维护。电力设备的安全稳定运行与对其进行细致入微的管理和维护密不可分，必须建立一套系统完善的检修方案，对配电变压器、开关等电力设备进行检修，同时，应根据对电力设备运行状态的诊断分析，有序安排检修项目和检修时间。在技术水平达标、条件允许并能保证设备和人员安全的情况下，可通过带电作业来减少系统停电时间，提高系统可靠性。

4) 引入新型接线方式。接线方式对可靠性的影响极为重要，国内普遍采用的接线方式因其自身限制而无法达到更高的可靠性要求。因此，对于可靠性要求极高的A+类供电区域，应借鉴国外优秀的网架结构，引入适合国内发展的双环网和花瓣形接线方式，提升线路整体可靠性水平，满足城市核心区域用户苛刻的可靠性要求。

加装自动化设备后，倒闸时间由原来的2 h缩减为0.5 h，其他参数与表2相同，同样假设线路按负荷均匀分成三段，有12台变压器，在线路负荷均匀分布且负载率合格的情况下，各类接线方式可靠性计算结果如表4所示。与表3的结果相对比，可以看出加装自动化设备后线路的可靠性水平得到明显提升，这种提升对于农网以及相对落后地区尤为明显。若还需进一步提高线路可靠性，可对线路进行最优分段并结合自动化设备。所得可靠性结果如表5所示，线路可靠性得到进一

表4 加装自动化设备后的可靠性结果

| 接线方式 | 转供类型 | 供电区域 | 负荷密度/(MW·km <sup>-2</sup> ) | 线长/km | 架空可靠性(%) | 电缆可靠性(%) |
|------|------|------|-----------------------------|-------|----------|----------|
| 单辐射  | 无联络  | 农网   | 0.1                         | 5     | 99.963 2 | \        |
|      |      |      | 0.1                         | 10    | 99.928 7 | \        |
|      |      |      | 0.1                         | 15    | 99.894 1 | \        |
|      |      | D、E  | 1                           | 5     | 99.972 1 | \        |
|      |      |      | 1                           | 10    | 99.946 0 | \        |
|      |      |      | 1                           | 15    | 99.919 8 | \        |

(续)

| 接线方式     | 转供类型 | 供电区域 | 负荷密度/(MW·km <sup>-2</sup> ) | 线长/km | 架空可靠性(%) | 电缆可靠性(%) |
|----------|------|------|-----------------------------|-------|----------|----------|
| 单环网、n供一备 | 单联络  | D、E  | 1                           | 3     | 99.990 3 | \        |
|          |      |      | 1                           | 5     | 99.984 4 | \        |
|          |      |      | 1                           | 10    | 99.969 7 | \        |
|          |      |      | 1                           | 15    | 99.955 1 | \        |
|          |      | B、C  | 6                           | 3     | 99.993 0 | 99.998 2 |
|          |      | A+、A | 15                          | 3     | 99.994 4 | 99.998 5 |
|          |      |      | 30                          | 3     | 99.994 4 | 99.998 5 |
|          |      |      |                             |       |          |          |
| 多分段多联络   | 多联络  | D、E  | 1                           | 3     | 99.990 3 | \        |
|          |      |      | 1                           | 5     | 99.984 4 | \        |
|          |      |      | 1                           | 10    | 99.969 7 | \        |
|          |      |      | 1                           | 15    | 99.955 1 | \        |
|          |      | B、C  | 6                           | 3     | 99.993 0 | 99.998 2 |
|          |      | A+、A | 15                          | 3     | 99.994 4 | 99.998 5 |
|          |      |      | 30                          | 3     | 99.994 4 | 99.998 5 |
|          |      |      |                             |       |          |          |

表5 含最优分段和自动化设备的可靠性结果

| 接线方式     | 转供类型 | 供电区域 | 负荷密度/(MW·km <sup>-2</sup> ) | 线长/km | 架空可靠性(%) | 电缆可靠性(%) |
|----------|------|------|-----------------------------|-------|----------|----------|
| 单辐射      | 无联络  | 农网   | 0.1                         | 5     | 99.974 3 | \        |
|          |      |      | 0.1                         | 10    | 99.950 7 | \        |
|          |      |      | 0.1                         | 15    | 99.929 1 | \        |
|          |      | D、E  | 1                           | 5     | 99.983 1 | \        |
|          |      |      | 1                           | 10    | 99.969 4 | \        |
|          |      |      | 1                           | 15    | 99.954 5 | \        |
| 单环网、n供一备 | 单联络  | D、E  | 1                           | 3     | 99.992 1 | \        |
|          |      |      | 1                           | 5     | 99.989 5 | \        |
|          |      |      | 1                           | 10    | 99.980 1 | \        |
|          |      |      | 1                           | 15    | 99.972 6 | \        |
|          |      | B、C  | 6                           | 3     | 99.994 3 | 99.998 7 |
|          |      | A+、A | 15                          | 3     | 99.995 2 | 99.999 2 |
|          |      |      | 30                          | 3     | 99.995 2 | 99.999 2 |
|          |      |      |                             |       |          |          |
| 多分段多联络   | 多联络  | D、E  | 1                           | 3     | 99.992 1 | \        |
|          |      |      | 1                           | 5     | 99.989 5 | \        |
|          |      |      | 1                           | 10    | 99.980 1 | \        |
|          |      |      | 1                           | 15    | 99.972 6 | \        |
|          |      | B、C  | 6                           | 3     | 99.994 3 | 99.998 7 |
|          |      | A+、A | 15                          | 3     | 99.995 2 | 99.999 2 |
|          |      |      | 30                          | 3     | 99.995 2 | 99.999 2 |

步提升。备，可满足用户差异化的可靠性需求。EA

因此，在电力市场下，根据实际情况选择合理接线方式的同时，配合最优分段以及自动化设

(收稿日期：2017.12.04)

(编辑：刘群彦)