计及不确定性的配电网合环点安全性与经济性评估

冯欣桦[1]，黎洪光[1]，郑 欣[1]，朱建全[2]，李玉荣[1]

(1.广州供电局有限公司，广东 广州 510620；2.华南理工大学电力学院，广东 广州 510640)

摘要：系统地研究了计及不确定性的配电网合环点安全性与经济性评估问题，并在某地配电网进行实际应用。首先，从配电网合环运行的实际需求出发，探讨一种配电网合环点的安全性与经济性评估的总体框架。其次，充分考虑电力系统状态的不确定性的影响，提出一种新的合环电流区间与网损区间计算方法。该方法可以确定合环电流和网损的变化范围，为配电网合环点的安全性与经济性评估提供依据。再次，提出一种新型的区间数比较方法，从可信度的角度对合环电流区间与网损区间的优劣情况进行对比。进一步提出一种新的配电网合环点的安全与经济性双层评估方法，从安全与经济两个层面选出总体最优的配电网合环点。最后，将所提方法应用于某地配电网合环点的选择中，结果表明了所提方法的可行性与有效性。

关键词：配电网；合环点；评估；不确定性；区间理论

Security and economy evaluation of closed loop point of distribution network considering uncertainty

FENG Xinhua[1], LI Hongguang[1], ZHENG Xin[1], ZHU Jianquan[2], LI Yurong[1]

(1. Guangzhou Power Supply Bureau, Guangzhou 510620, China; 2. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The security and economy evaluation of closed loop point of distributed network considering uncertainty is studied, and then is applied in one actual distribution network. First, responding to the requirement of loop-closed operation of distribution metwork, a framework of security and economy evaluation of closed loop point is proposed. Secondly, taking into account the uncertainty of distribution network, a method of calculating the intervals of closed loop current and power loss is given based on interval theory, such then the scopes of closed loop current and power loss are made clear, respectively, providing a basis for the security and economy evaluation. Furthermore, a novel comparison method of interval number is put forward for comparing the intervals of closed loop current and power loss in probability. The two-level evaluation measure is also presented to synthesize the security and economy evaluation results, such that the optimal closed loop point of distribution network is chosen. Finally, the proposed method is applied in one actual distribution network, and the results show its feasibility and validity.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307064), Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. S2013040015586), Science and Technology Project of China Southern Power Grid Company (No. 0165HK1200429), and Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (No. 20130172120044).

Key words: distribution network; closed loop point; evaluation; uncertainty; interval theory

中图分类号： TM721 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2015)10-0030-08

0 引言

配电网合环运行对于提高供电可靠性具有重要意义[1]。由于长期受到缺电的困扰，我国在电力建设过程中曾一度出现“重发，轻供，不管用”的偏向，致使配电网成为我国电网较为薄弱的一个环节[2-5]。随着经济社会的发展，人们对电能质量的要求不断提高，配电网的建设也得到了越来越多的重视[6-9]。通过近年的城网改造，目前的配电网已经具备了闭环运行的结构，但仍采取开环运行的模式。只有在线路检修等情况下才进行合环转供电，将需要停运线路的负荷转移至正常运行的线路，避免停

基金项目：国家自然科学基金资助项目(51307064)；广东自然科学基金资助项目(S2013040015586)；中国南方电网有限责任公司科技项目(0165HK1200429)；高等学校博士学科点专项科研基金(20130172120044)

电现象[10]。但这种短时的合环状态并不能解决故障情况下重要用户的持续供电问题。为此，国内部分学者开始进行合环运行的研究，即在现在已经具备的闭环运行条件的电网结构的基础上，进一步将开环运行模式改变为合环运行的模式，这可以充分提高现有的电网设备的利用率，并保障故障情况下重要用户的不断电供应[11]。

合环点的选择是配电网合环运行的一个重要的基础性问题。为了实施合环操作，首先便要选择出一个好的合环点。这种合环点的选择方法不需要增加额外的投入，但对于配电网合环运行意义重大。这是因为不同合环点对应的环路的结构和参数是有差别的，其潮流分布情况也会不一样，并由此表现出不同的安全性和经济性。在某一合环点下，合环运行的部分线路可能由于电流过载而引发安全性问题，并产生较大的网损而致使其经济性低下。如果能选择其他的合环点，则其潮流分布可能更为合理，使其安全性和经济性得到较大的提升。

目前关于配电网合环点的选择的研究仍未见报道。文献[12]对配电网的合环运行模式进行总结，并进一步对不同合环模式下的合环点数量进行统计，但仍未对合环点的选择问题进行探讨。此外，合环点选择过程中所关注的安全性与经济性问题均要以合环计算为基础，虽然文献[13-14]已对配电网合环运行的模型与算法进行相应的研究，但这些研究均建立在确定性方法的基础之上。由于配电网合环运行的时间较长，期间电力系统的状态会由于运行方式的变化而出现较大的波动，这种确定性的计算方法只能算出某一特定状态下合环点对应的安全性与经济性，而不能全面反映电力状态变化对其安全性与经济性的影响情况。

本文拟对计及不确定性的配电网合环点选择问题进行研究，并将所提的理论方法应用于某地配电网，为该配电网的合环点的选择提供决策依据。

1　配电网合环点安全性与经济性评估总体框架

在配电网合环运行时，若具有两个以上的合环点，便存在一个这样的问题：选取哪个合环点更为安全、经济？在安全性方面，主要需要关注某一合环点下线路是否会出现过流的问题。由于合环电流受运行方式等因素的影响而在一定的范围内不断变化，因而需要计算出各个合环点所对应的合环电流区间，并对这些合环电流区间进行比较，确定它们在安全性方面的优劣情况。在经济性方面，由于合环点的选择并不涉及投资问题，不同合环点的差异主要体现在网损方面。与合环电流一样，电力系统的状态变化也将使网损在一个范围内波动，故也要计算配电网在不同合环点下运行的网损区间，并以此为基础对这些合环点的经济性进行比较。

由于每一个合环点均涉及安全性和经济性问题，而不同合环点的安全性与经济性往往是有差别的，因此必须对各个合环点的安全性与经济性评估结果进行综合，才能确定安全性与经济性综合最优的合环点。

根据上述思想，本文提出了图 1 所示的配电网合环点安全性与经济性评估的总体框架。在该框架下，配电网合环点的安全性与经济性评估包括电流与网损区间计算、区间比较和综合评估三个环节。其中，电流与网损区间计算的目的是为了得到不同合环点下合环电流和网损的变化范围；区间比较主要是从这些合环点的电流区间和网损区间出发，对它们的安全性和经济性进行评估；综合评估的目的是将各个合环点的安全性与经济性评估结果进行综合，全面判断它们的优劣情况。以下逐一对这三个环节进行介绍。

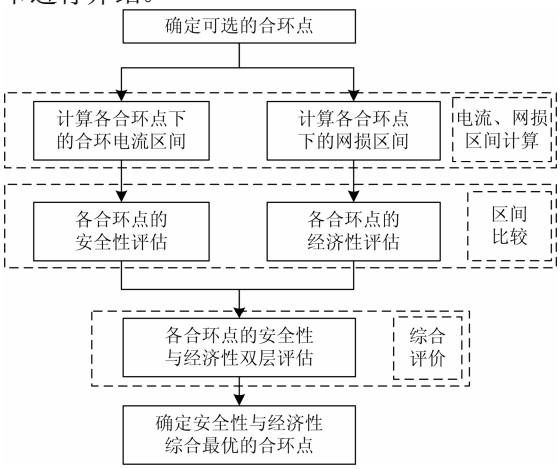

图 1 配电网合环点安全性与经济性评估总体框架

Fig. 1 Framework of security and economy evaluation of closed loop point

2　合环电流区间与网损区间计算

2.1 配电网合环电流与网损计算基本理论

配电网的安全性与经济性情况主要根据配电网合环电流和网损进行评价。其中，合环电流和网损的计算建立在图 2 所示的模型的基础之上。

为了进行合环电流计算，一般可以采用叠加法。即先计算出合环点两侧电压差引起的环流，再与合环馈线的原电流叠加，从而得到合环运行过程中各

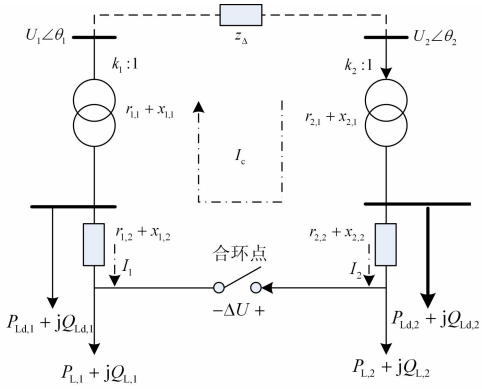

图 2 配电网合环运行计算模型

Fig. 2 Calculation model of loop-closed operation of distribution network

条馈线的电流。根据叠加定理有

$$\dot{I}_i^h = \dot{I}_i + \dot{I}_c \tag{1}$$

$$\dot{I}_c = \frac{\Delta\dot{U}}{Z_\Sigma} \tag{2}$$

$$Z_\Sigma = \sum_{j=1}^{2}\sum_{i=1}^{2}\left(r_{j,i}+x_{j,i}\right)+z_\Delta \tag{3}$$

式中：$\dot{I}_i$ 和 $\dot{I}_i^h$ 分别为合环前后第 i 个元件的电流相量，其参考方向为从电源侧指向负荷侧；$\dot{I}_c$ 为合环点两侧电压差引起的环流相量；$\Delta\dot{U}$ 为合环点两侧的电压差相量；Z_Σ 为合环线路的总阻抗；z_Δ 为外网等值阻抗，可等效外部电网对合环电流的影响作用。

在 10 kV 配电网中，一般无法直接获取合环点两侧的电压幅值和相角，而需通过潮流计算得到，具体可以采用前推回代法。该方法收敛性强，适合用于配电网的潮流计算[15-16]。

合环运行的配电网的网损主要由合环点左右两侧的变压器和线路的损耗组成。根据功率的计算公式，有

$$\Delta P = \sum_{i=1}^{4} I_i^2 r_i \tag{4}$$

式中：ΔP 为合环运行的功率总损耗；I_i 为流经元件 i 的电流有效值，可通过式(1)和式(2)得到；r_i 为元件 k 的电阻值。

通过式(1)~式(4)，便可分别计算出不同合环点对应的合环电流和网损的确定值。但由于合环运行的时间较长，期间电力系统的状态不断变化，合环电流与网损也相应地表现出一定的不确定性，故以下将引入区间理论，对计及不确定性的配电网合环电流和网损进行研究。

2.2 计及不确定性的配电网合环电流与网损研究

2.2.1 区间分析

区间分析是Moore于1966年针对参数的不确定性对计算结果的变化范围的影响情况而提出的理论方法[17]。

对于 $\underline{x},\overline{x}\in\mathbf{R}$，若 $\underline{x}\le\overline{x}$，则闭有界集合 $\tilde{x}=\left[\underline{x},\overline{x}\right]$ 称为区间数，$\underline{x},\overline{x}$ 分别称为区间的下端点和上端点。对于区间数 $\tilde{x},\tilde{y}$，其运算法则为

$$\tilde{x}+\tilde{y}=\left[\underline{x}+\underline{x},\overline{y}+\overline{y}\right] \tag{5}$$

$$\tilde{x}-\tilde{y}=\left[\underline{x}-\overline{y},\overline{x}-\underline{y}\right] \tag{6}$$

$$\tilde{x}\cdot\tilde{y}=\left[\min\left(\underline{x}\underline{y},\underline{x}\overline{y},\overline{x}\underline{y},\overline{x}\overline{y}\right),\ \max\left(\underline{x}\underline{y},\underline{x}\overline{y},\overline{x}\underline{y},\overline{x}\overline{y}\right)\right] \tag{7}$$

$$\tilde{x}/\tilde{y}=\left[\min\left(\underline{x}/\underline{y},\underline{x}/\overline{y},\overline{x}/\underline{y},\overline{x}/\overline{y}\right),\ \max\left(\underline{x}/\underline{y},\underline{x}/\overline{y},\overline{x}/\underline{y},\overline{x}/\overline{y}\right)\right],\text{若}[0]\notin\tilde{y} \tag{8}$$

2.2.2 基于区间理论的合环电流与网损计算

为了计算状态不确定条件下的配电网合环电流与网损情况，本文先将区间理论和配电网潮流计算方法进行有效综合，计算出合环前各个元件的电流区间以及合环点两侧的电压差区间；再由合环点两侧的电压差区间算出合环后引起的环流区间；接着根据叠加定理，计算环流叠加在合环前的电流上得到的各个元件的电流区间；最后根据有功功率的计算公式，计算出各个元件产生的网损区间，综合后便可得到总的网损区间。具体计算过程可通过下列步骤描述如下。

步骤 1：输入进行合环电流区间和网损区间计算需要用到的相关参数，包括合环前高压侧母线的电压幅值区间 $\left[\underline{U},\overline{U}\right]$ 和相角区间 $\left[\underline{\theta},\overline{\theta}\right]$，变压器低压侧的有功功率区间 $\left[\underline{P_{Ld}},\overline{P_{Ld}}\right]$ 和无功功率区间 $\left[\underline{Q_{Ld}},\overline{Q_{Ld}}\right]$，以及变压器的电阻 r_T 和电抗 x_T，合环馈线的有功功率区间 $\left[\underline{P_L},\overline{P_L}\right]$ 和无功功率区间 $\left[\underline{Q_L},\overline{Q_L}\right]$，合环馈线的电阻 r 和电抗 x。

步骤 2：计算合环馈线的有功损耗区间 $\left[\underline{\Delta P_L},\overline{\Delta P_L}\right]$ 和无功损耗区间 $\left[\underline{\Delta Q_L},\overline{\Delta Q_L}\right]$。

$$\left[\underline{\Delta P_L},\overline{\Delta P_L}\right]=r\times\left(\left[\underline{P_L},\overline{P_L}\right]^2+\left[\underline{Q_L},\overline{Q_L}\right]^2\right) \tag{9}$$

$$\left[\underline{\Delta Q_L},\overline{\Delta Q_L}\right]=x\times\left(\left[\underline{P_L},\overline{P_L}\right]^2+\left[\underline{Q_L},\overline{Q_L}\right]^2\right) \tag{10}$$

步骤 3：计算变压器低压侧的有功功率区间 $\left[\underline{P_T},\overline{P_T}\right]$ 和无功功率区间 $\left[\underline{Q_T},\overline{Q_T}\right]$。

$$\left[\underline{P_{\mathrm{T}}},\overline{P_{\mathrm{T}}}\right]=\left[\underline{P_{\mathrm{L}}},\overline{P_{\mathrm{L}}}\right]+\left[\underline{\Delta P_{\mathrm{L}}},\overline{\Delta P_{\mathrm{L}}}\right]+\left[\underline{P_{\mathrm{Ld}}},\overline{P_{\mathrm{Ld}}}\right] \tag{11}$$

$$\left[\underline{Q_{\mathrm{T}}},\overline{Q_{\mathrm{T}}}\right]=\left[\underline{Q_{\mathrm{L}}},\overline{Q_{\mathrm{L}}}\right]+\left[\underline{\Delta Q_{\mathrm{L}}},\overline{\Delta Q_{\mathrm{L}}}\right]+\left[\underline{Q_{\mathrm{Ld}}},\overline{Q_{\mathrm{Ld}}}\right] \tag{12}$$

步骤 4：计算变压器的有功损耗区间$\left[\underline{\Delta P_{\mathrm{T}}},\overline{\Delta P_{\mathrm{T}}}\right]$和无功损耗区间$\left[\underline{\Delta Q_{\mathrm{T}}},\overline{\Delta Q_{\mathrm{T}}}\right]$。

$$\left[\underline{\Delta P_{\mathrm{T}}},\overline{\Delta P_{\mathrm{T}}}\right]=r_{\mathrm{T}}\left(\left[\underline{P_{\mathrm{T}}},\overline{P_{\mathrm{T}}}\right]^2+\left[\underline{Q_{\mathrm{T}}},\overline{Q_{\mathrm{T}}}\right]^2\right) \tag{13}$$

$$\left[\underline{\Delta Q_{\mathrm{T}}},\overline{\Delta Q_{\mathrm{T}}}\right]=x_{\mathrm{T}}\left(\left[\underline{P_{\mathrm{T}}},\overline{P_{\mathrm{T}}}\right]^2+\left[\underline{Q_{\mathrm{T}}},\overline{Q_{\mathrm{T}}}\right]^2\right) \tag{14}$$

步骤 5：计算变压器高压侧的有功功率区间$\left[\underline{P},\overline{P}\right]$和无功功率区间$\left[\underline{Q},\overline{Q}\right]$。

$$\left[\underline{P},\overline{P}\right]=\left[\underline{P_{\mathrm{T}}},\overline{P_{\mathrm{T}}}\right]+\left[\underline{\Delta P_{\mathrm{T}}},\overline{\Delta P_{\mathrm{T}}}\right] \tag{15}$$

$$\left[\underline{Q},\overline{Q}\right]=\left[\underline{Q_{\mathrm{T}}},\overline{Q_{\mathrm{T}}}\right]+\left[\underline{\Delta Q_{\mathrm{T}}},\overline{\Delta Q_{\mathrm{T}}}\right] \tag{16}$$

步骤 6：计算变压器电压降落的纵分量区间$\left[\underline{\Delta U_{\mathrm{T}}},\overline{\Delta U_{\mathrm{T}}}\right]$和横分量区间$\left[\underline{\delta U_{\mathrm{T}}},\overline{\delta U_{\mathrm{T}}}\right]$。

$$\left[\underline{\Delta U_{\mathrm{T}}},\overline{\Delta U_{\mathrm{T}}}\right]=\frac{\left[\underline{P},\overline{P}\right]\times r_{\mathrm{T}}+\left[\underline{Q},\overline{Q}\right]\times x_{\mathrm{T}}}{\left[\underline{U},\overline{U}\right]} \tag{17}$$

$$\left[\underline{\delta U_{\mathrm{T}}},\overline{\delta U_{\mathrm{T}}}\right]=\frac{\left[\underline{P},\overline{P}\right]\times x_{\mathrm{T}}-\left[\underline{Q},\overline{Q}\right]\times r_{\mathrm{T}}}{\left[\underline{U},\overline{U}\right]} \tag{18}$$

步骤 7：计算变压器低压侧电压的实部分量区间$\left[\underline{U_{\mathrm{T}}^{'}},\overline{U_{\mathrm{T}}^{'}}\right]$和虚部分量区间$\left[\underline{U_{\mathrm{T}}^{''}},\overline{U_{\mathrm{T}}^{''}}\right]$，以及幅值区间$\left[\underline{U_{\mathrm{T}}},\overline{U_{\mathrm{T}}}\right]$和相角区间$\left[\underline{\theta_{\mathrm{T}}},\overline{\theta_{\mathrm{T}}}\right]$。

$$\left[\underline{U_{\mathrm{T}}^{'}},\overline{U_{\mathrm{T}}^{'}}\right]=\left[\underline{U},\overline{U}\right]\times\cos\left[\underline{\theta},\overline{\theta}\right]-\left[\underline{\Delta U_{\mathrm{T}}},\overline{\Delta U_{\mathrm{T}}}\right] \tag{19}$$

$$\left[\underline{U_{\mathrm{T}}^{''}},\overline{U_{\mathrm{T}}^{''}}\right]=\left[\underline{U},\overline{U}\right]\times\sin\left[\underline{\theta},\overline{\theta}\right]-\left[\underline{\delta U_{\mathrm{T}}},\overline{\delta U_{\mathrm{T}}}\right] \tag{20}$$

$$\left[\underline{U_{\mathrm{T}}},\overline{U_{\mathrm{T}}}\right]=\sqrt{\left[\underline{U_{\mathrm{T}}^{'}},\overline{U_{\mathrm{T}}^{'}}\right]^2+\left[\underline{U_{\mathrm{T}}^{''}},\overline{U_{\mathrm{T}}^{''}}\right]^2} \tag{21}$$

$$\left[\underline{\theta_{\mathrm{T}}},\overline{\theta_{\mathrm{T}}}\right]=\tan^{-1}\left(\frac{\left[\underline{U_{\mathrm{T}}^{''}},\overline{U_{\mathrm{T}}^{''}}\right]}{\left[\underline{U_{\mathrm{T}}^{'}},\overline{U_{\mathrm{T}}^{'}}\right]}\right) \tag{22}$$

步骤 8：计算合环馈线电压降落的纵分量区间$\left[\underline{\Delta U_{\mathrm{L}}},\overline{\Delta U_{\mathrm{L}}}\right]$和横分量区间$\left[\underline{\delta U_{\mathrm{L}}},\overline{\delta U_{\mathrm{L}}}\right]$。

$$\left[\underline{\Delta U_{\mathrm{L}}},\overline{\Delta U_{\mathrm{L}}}\right]=\frac{\left[\underline{P_{\mathrm{T}}},\overline{P_{\mathrm{T}}}\right]\times r+\left[\underline{Q_{\mathrm{T}}},\overline{Q_{\mathrm{T}}}\right]\times x}{\left[\underline{U_{\mathrm{T}}},\overline{U_{\mathrm{T}}}\right]} \tag{23}$$

$$\left[\underline{\delta U_{\mathrm{L}}},\overline{\delta U_{\mathrm{L}}}\right]=\frac{\left[\underline{P_{\mathrm{T}}},\overline{P_{\mathrm{T}}}\right]\times x-\left[\underline{Q_{\mathrm{T}}},\overline{Q_{\mathrm{T}}}\right]\times r}{\left[\underline{U_{\mathrm{T}}},\overline{U_{\mathrm{T}}}\right]} \tag{24}$$

步骤 9：计算合环点电压的实部分量区间$\left[\underline{U_{\mathrm{L}}^{'}},\overline{U_{\mathrm{L}}^{'}}\right]$和虚部分量区间$\left[\underline{U_{\mathrm{L}}^{'}},\overline{U_{\mathrm{L}}^{'}}\right]$，以及幅值区间$\left[\underline{U_{\mathrm{L}}},\overline{U_{\mathrm{L}}}\right]$和相角区间$\left[\underline{\theta_{\mathrm{L}}},\overline{\theta_{\mathrm{L}}}\right]$。

$$\left[\underline{U_{\mathrm{L}}^{'}},\overline{U_{\mathrm{L}}^{'}}\right]=\left[\underline{U_{\mathrm{T}}},\overline{U_{\mathrm{T}}}\right]\times\cos\left[\underline{\theta_{\mathrm{T}}},\overline{\theta_{\mathrm{T}}}\right]-\left[\underline{\Delta U_{\mathrm{L}}},\overline{\Delta U_{\mathrm{L}}}\right] \tag{25}$$

$$\left[\underline{U_{\mathrm{L}}^{''}},\overline{U_{\mathrm{L}}^{''}}\right]=\left[\underline{U_{\mathrm{T}}},\overline{U_{\mathrm{T}}}\right]\times\sin\left[\underline{\theta_{\mathrm{T}}},\overline{\theta_{\mathrm{T}}}\right]-\left[\underline{\delta U_{\mathrm{L}}},\overline{\delta U_{\mathrm{L}}}\right] \tag{26}$$

$$\left[\underline{U_{\mathrm{L}}},\overline{U_{\mathrm{L}}}\right]=\sqrt{\left[\underline{U_{\mathrm{L}}^{'}},\overline{U_{\mathrm{L}}^{'}}\right]^2+\left[\underline{U_{\mathrm{L}}^{''}},\overline{U_{\mathrm{L}}^{''}}\right]^2} \tag{27}$$

$$\left[\underline{\theta_{\mathrm{L}}},\overline{\theta_{\mathrm{L}}}\right]=\tan^{-1}\left(\frac{\left[\underline{U_{\mathrm{L}}^{''}},\overline{U_{\mathrm{L}}^{''}}\right]}{\left[\underline{U_{\mathrm{L}}^{'}},\overline{U_{\mathrm{L}}^{'}}\right]}\right) \tag{28}$$

步骤 10：重复步骤 2~步骤 9，直至各个节点的电压区间差额和功率区间差额小于某一设定的参数。

步骤 11：由上述步骤分别计算出合环点左右两侧的电压区间$\left[\underline{U_{\mathrm{a}}},\overline{U_{\mathrm{a}}}\right]$和$\left[\underline{U_{\mathrm{b}}},\overline{U_{\mathrm{b}}}\right]$。以逆时针方向为参考方向，计算合环点两侧的电压差区间$\left[\underline{\Delta U},\overline{\Delta U}\right]$。

$$\left[\underline{\Delta U},\overline{\Delta U}\right]=\left[\underline{U_{\mathrm{a}}},\overline{U_{\mathrm{a}}}\right]-\left[\underline{U_{\mathrm{b}}},\overline{U_{\mathrm{b}}}\right] \tag{29}$$

步骤 12：计算环流区间$\left[\underline{I_{\mathrm{c}}},\overline{I_{\mathrm{c}}}\right]$。

$$\left[\underline{I_{\mathrm{c}}},\overline{I_{\mathrm{c}}}\right]=\frac{\left[\underline{\Delta U},\overline{\Delta U}\right]}{Z_{\Sigma}} \tag{30}$$

步骤 13：计算合环前合环点左右两侧负荷的电流区间$\left[\underline{I_{\mathrm{L1}}},\overline{I_{\mathrm{L1}}}\right]$和$\left[\underline{I_{\mathrm{L2}}},\overline{I_{\mathrm{L2}}}\right]$。

$$\left[\underline{I_{\mathrm{L1}}},\overline{I_{\mathrm{L1}}}\right]=\frac{\left[\underline{P_{\mathrm{L1}}},\overline{P_{\mathrm{L1}}}\right]+\mathrm{j}\left[\underline{Q_{\mathrm{L1}}},\overline{Q_{\mathrm{L1}}}\right]}{\left[\underline{U_{\mathrm{L1}}},\overline{U_{\mathrm{L1}}}\right]} \tag{31}$$

$$\left[\underline{I_{\mathrm{L2}}},\overline{I_{\mathrm{L2}}}\right]=\frac{\left[\underline{P_{\mathrm{L2}}},\overline{P_{\mathrm{L2}}}\right]+\mathrm{j}\left[\underline{Q_{\mathrm{L2}}},\overline{Q_{\mathrm{L2}}}\right]}{\left[\underline{U_{\mathrm{L2}}},\overline{U_{\mathrm{L2}}}\right]} \tag{32}$$

步骤 14：计算合环后左右两侧的合环电流区间$\left[\underline{I_{1}},\overline{I_{1}}\right]$和$\left[\underline{I_{2}},\overline{I_{2}}\right]$。

$$\left[\underline{I_{1}},\overline{I_{1}}\right]=\left[\underline{I_{\mathrm{L1}}},\overline{I_{\mathrm{L1}}}\right]+\left[\underline{I_{\mathrm{c}}},\overline{I_{\mathrm{c}}}\right] \tag{33}$$

$$\left[\underline{I_{2}},\overline{I_{2}}\right]=\left[\underline{I_{\mathrm{L2}}},\overline{I_{\mathrm{L2}}}\right]-\left[\underline{I_{\mathrm{c}}},\overline{I_{\mathrm{c}}}\right] \tag{34}$$

步骤 15：计算总网损区间$\left[\underline{\Delta P},\overline{\Delta P}\right]$。

$$\left[\underline{\Delta P},\overline{\Delta P}\right]=\left[\underline{I_{1}},\overline{I_{1}}\right]^2\times\left(r_{\mathrm{T1}}+r_{1}\right)+\left[\underline{I_{2}},\overline{I_{2}}\right]^2\times\left(r_{\mathrm{T2}}+r_{2}\right) \tag{35}$$

3 合环电流区间与网损区间评估

通过上述的研究，可以计算出配电网在不同合环点下进行合环时的电流区间和网损区间。如果合环电流越小，就说明合环线路越限的可能性就越小，合环运行的安全性就越高，因此可以通过对合环电流的大小对不同合环点的安全性的优劣情况进行评估。类似地，也可通过不同合环点的网损确定它们的经济性的优劣情况。但是由于本文考虑了电力系统的状态不确定性的影响，合环电流和网损均表现为区间形式。可以认为合环电流和网损在其区间内随机变化，这给它们的比较带来了困难。可信度理论的提出为随机性问题的度量提供了一种重要的手段[18]。为此，本文从可信度的角度提出了一种新的合环电流和网损区间的比较方法。首先给出区间中点的定义如下。

定义 3：对于区间数 $\tilde{A}=\left[\underline{A},\overline{A}\right]$，则其中点为 $\mathrm{mid}\left(A\right)=\left(\underline{A}+\overline{A}\right)/2$。

对于两个区间数 $\tilde{A}$、$\tilde{B}$，区间 $\tilde{A}$ 与区间 $\tilde{B}$ 的大小关系可通过可信度 $\mu\left(A<B\right)$ 进行度量，其中 $\mu\left(A<B\right)$ 的计算方法为

$$\mu\left(A<B\right)=\begin{cases}1, & \underline{A}<\overline{A}\le\underline{B}<\overline{B}\\ 0, & \underline{B}<\overline{B}<\underline{A}<\overline{A}\\ 0.5, & \mathrm{mid}\left(A\right)=\mathrm{mid}\left(B\right)\\ 1-0.5\left(\overline{A}-\underline{B}\right)/\left(\overline{B}-\underline{B}\right), & \underline{A}\le\underline{B}<\overline{A}\le\overline{B}\\ 0.5\left(\overline{B}-\underline{A}\right)/\left(\overline{A}-\underline{A}\right), & \underline{B}\le\underline{A}<\overline{B}\le\overline{A}\\ 0.75-0.5\left(\mathrm{mid}\left(A\right)-\underline{B}\right)/\left(\overline{B}-\underline{B}\right), & \underline{B}\le\underline{A}<\overline{A}\le\overline{B}\\ 0.25+0.5\left(\mathrm{mid}\left(B\right)-\underline{A}\right)/\left(\overline{A}-\underline{A}\right), & \underline{A}\le\underline{B}<\overline{B}\le\overline{A}\end{cases} \tag{36}$$

根据上述方法，便可从可信度的角度对合环电流区间和网损区间进行比较。若 $\mu\left(A<B\right)>0.5$，则区间数 $\tilde{A}$ 小于区间数 $\tilde{B}$ 是可信的；反之则认为区间数 $\tilde{A}$ 小于区间数 $\tilde{B}$ 并不可信。通过这种方式，便可实现对不同合环点的安全性和经济性的有效评估。

4 配电网合环运行的安全性与经济性双层评估

通过上述的合环电流区间和网损区间比较，便可确定不同的合环点对应的安全性或经济性情况。由于合环点的选择同时涉及安全性和经济性两个方面的问题，所以还需要对上述的安全性与经济性评价结果进行综合，才能选出总体最优的合环点。

根据电力生产“高于一切，先于一切”的理念，本文在进行合环点的选择时将安全性评估结果和经济性评估结果置于两个不同的层次。安全性评估处于高层，即在安全性存在问题的情况下，从安全性评估结果选择合环点；经济性评估处于下层，在各合环点的安全性均不存在问题的情况下，再从经济性的角度选择合环点。按照上述原则，本文提出了一种新的配电网合环点安全经济性双层评估方法，具体流程如图 3 所示。

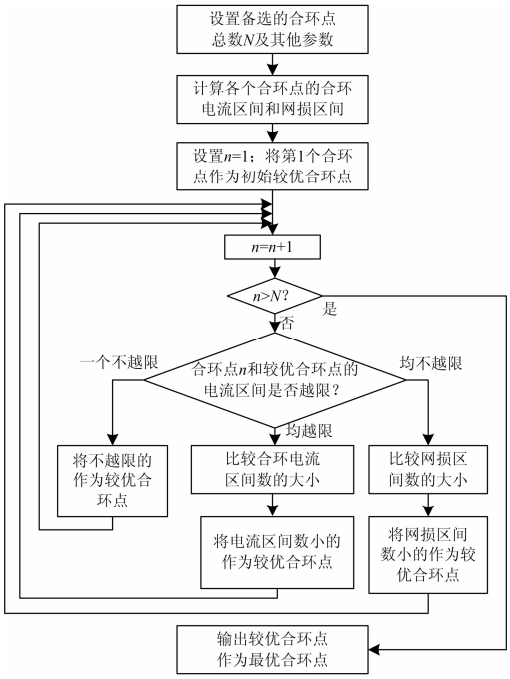

图 3 合环点的安全性与经济性双层评估流程

Fig. 3 Flow chart of two-level evaluation of security and economy of closed loop points

利用安全性与经济性双层评估的方法，可以对不同的合环点两两进行对比，直至选出最优的合环点。在此过程中，既可以突出电力安全的首要地位，又可以兼顾经济性的要求，从而实现配电网合环运行点的优化选择。

5 算例分析

以某地电网为例，对两个典型的待合环线路进行计算分析，其中每个合环线路均具有两个合环点。设定基准容量为10 MVA，变压器高压侧的基准电压为115 kV，低压侧的基准电压为10.5 kV；按工程经验，外网等值阻抗取为：0.002+j0.012 p.u.；合环点两侧变电站的电压幅区间按−3%~＋7%考虑，相角区间按−5°～0°考虑。各合环线路的结构如表1和图4、图5所示，阻抗参数和合环前的负荷功率区间如表

2～表4所示，各合环馈线的额定载流量见表5。表6和表7分别给出了不同合环点下的合环电流区间和网损区间的计算结果。

从表6可以看出，第一个合环线路在选择开发区开关作为合环点时，北流F6线和北流F19线的电流区间数分别为[−0.178 2, −0.037 4] kA和[0.183 4，0.321 6] kA。北流F6线的合环电流区间出现了负值，这是因为这条馈线在合环前的电流比较小，而合环产生的环流比较大，这两者的方向相反，叠加之后电流便出现了负值。这说明实施合环运行后，在某些情况下这条馈线的负荷将由合环点另一侧的馈线供应，这时可由电流的绝对值校核其是否越限。从表5给出的数据来看，北流F6线和北流F19线的载流量分别为0.431 4 kA和0.476 4 kA，因而它们的电流区间均不越限，这说明选择开发区开关作为合环点并不存在安全性的问题。

表1 各合环线路的结构

Table 1 Structures of loop lines

环网序号	合环点	1 侧馈线	2 侧馈线
1	开发区开关	北流 F6 线	北流 F19 线
	恒昌开关	北流 F6 线	北流 F19 线
2	银都开关	北流 F17 线	北流 F32 线
	机楼开关	北流 F17 线	北流 F32 线

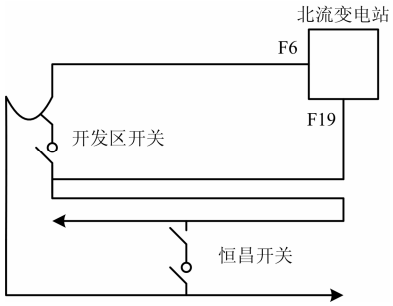

图 4 合环线路 1 的结构图

Fig. 4 Structure diagram of loop line 1

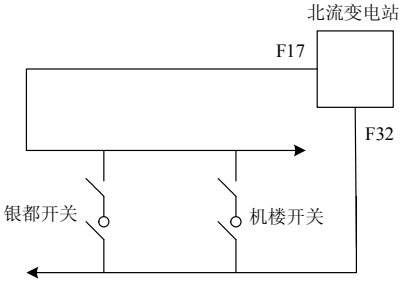

图 5 合环线路 2 的结构图

Fig. 5 Structure diagram of loop line 2

表 2 合环线路元件的阻抗值(标幺值)

Table 2 Impedances of devices in loop lines (p.u.)

开关	馈线	R_T	X_T	R_L	X_L
开发区开关	北流 F6 线	0.000 9	0.026 3	0.166 3	0.093 0
	北流 F19 线	0.000 9	0.026 3	0.145 3	0.075 9
恒昌开关	北流 F6 线	0.000 9	0.026 3	0.255 7	0.141 1
	北流 F19 线	0.003 6	0.026 3	0.174 1	0.089 4
银都开关	北流 F17 线	0.000 5	0.026 0	0.162 6	0.066 1
	北流 F32 线	0.000 6	0.025 6	0.140 1	0.041 7
机楼开关	北流 F17 线	0.000 5	0.026 0	0.201 0	0.074 2
	北流 F32 线	0.000 6	0.025 6	0.098 1	0.024 9

表 3 合环馈线的功率(标幺值)

Table 3 Power of feeders in the loops (p.u.)

开关	馈线	P_2	Q_2
开发区	北流 F6 线	[0.070 0, 0.140 0]	[0.032 00, 0.070 0]
开关	北流 F19 线	[0.080 0, 0.160 0]	[0.040 0, 0.080 0]
恒昌	北流 F6 线	[0.070 0, 0.140 0]	[0.030 0, 0.070 0]
开关	北流 F19 线	[0.080 0, 0.160 0]	[0.040 0, 0.080 0]
银都	北流 F17 线	[0.070 0, 0.130 0]	[0.030 0, 0.060 0]
开关	北流 F32 线	[0.030 0, 0.060 0]	[0.020 0, 0.030 0]
机楼	北流 F17 线	[0.070 0, 0.130 0]	[0.030 0, 0.060 0]
开关	北流 F32 线	[0.030 0, 0.060 0]	[0.020 0, 0.030 0]

表 4 变压器低压侧的功率(标幺值)

Table 4 Power in the low voltage side of transformers (p.u.)

开关	馈线	P_2	Q_2
开发区	北流 F6 线	[0.560 0, 0.640 0]	[0.270 0, 0.310 0]
开关	北流 F19 线	[0.620 0, 0.700 0]	[0.300 0, 0.340 0]
恒昌	北流 F6 线	[0.560 0, 0.640 0]	[0.270 0, 0.310 0]
开关	北流 F19 线	[0.620 0, 0.700 0]	[0.300 0, 0.340 0]
银都	北流 F17 线	[0.530 0, 0.600 0]	[0.260 0, 0.290 0]
开关	北流 F32 线	[0.250 0, 0.280 0]	[0.120 0, 0.140 0]
机楼	北流 F17 线	[0.530 0, 0.600 0]	[0.260 0, 0.290 0]
开关	北流 F32 线	[0.250 0, 0.280 0]	[0.120 0, 0.140 0]

表 5 各合环馈线的额定载流量

Table 5 Rated carrying capacities of currents of feeders

馈线	载流量/kA
北流 F6 线	0.431 4
北流 F19 线	0.476 4
北流 F17 线	0.408 0
北流 F32 线	0.192 6

表 6 各合环线路的环流及合环电流值

Table 6 Circulations and closed loop currents in the loops

开关	馈线	环流/kA	合环电流区间/kA
开发区开关	北流 F6 线	[0.135 8, 0.221 1]	[−0.178 2, −0.037 4]
	北流 F19 线		[0.183 4, 0.321 6]
恒昌开关	北流 F6 线	[0.101 9, 0.178 2]	[0.145 2, 0.278 9]
	北流 F19 线		[−0.130 5, −0.000 7]
银都开关	北流 F17 线	[0.132 3, 0.265 1]	[0.172 8, 0.357 7]
	北流 F32 线		[−0.246 2, −0.092 9]
机楼开关	北流 F17 线	[0.136 6, 0.280 1]	[0.177 3, 0.373 3]
	北流 F32 线		[−0.261 2, −0.097 4]

表 7 各合环线路的网损区间(标幺值)

Table 7 Power loss of the loops (p.u.)

环网序号	开关	有功网损 ($\times10^{-3}$)
1	开发区开关	[2.110 0, 10.986 8]
	恒昌开关	[2.900, 15.449 4]
2	银都开关	[1.050 0, 5.441 4]
	机楼开关	[1.216 0, 6.359 7]

第一个合环线路在选择恒昌开关作为合环点时，北流F6线和北流F19线的电流区间数分别为[0.145 2, 0.278 9] kA和[0.003 0, 0.003 4] kA，也不存在电流越限问题，因而是安全的。由于两个合环点的安全性均满足要求，根据本文所提的配电网合环点安全经济性双层评估方法，只需对其经济性进行比较。由表7的网损区间可以算出，开发区开关对应的网损小于恒昌开关对应的网损的可信度为0.677 8，这说明开发区开关的经济性优于恒昌开关是可信的，故选择开发区开关作为最优的合环点。

对于第二个合环线路，无论是选择银都开关还是机楼开关，北流 F32 侧的电流区间数的绝对值均存在越限的情况。从安全性的角度考虑，需要选择安全性更高的合环点。根据本文所提的区间数比较方法，银都开关的合环电流的区间数小于机楼开关的合环电流的可信度为 0.545 788，故选择银都开关作为合环点更为安全。

6 结论

本文研究了计及不确定性的配电网合环点安全性与经济性评估问题，并将其应用于某地电网，主要得出了如下结论：

(1) 提出了一种新的基于区间理论的配电网合环电流和网损计算方法，能全面考虑电力系统的状态变化的影响，得到不同合环点下的合环电流和网损的变化范围；

(2) 提出了一种新的区间数比较方法以实现合环电流区间与网损区间的评估，可从可信度的角度判断不同合环点的安全性和经济性的优劣情况；

(3) 提出了一种配电网合环点安全经济性双层评估方法，既能突出安全性的要求，又能兼顾经济性的情况，因而为配电网合环点的选择提供可靠的依据；

(4) 将所提的方法在某地电网进行实际应用，能较为有效地解决该配电网合环点的选择问题。

参考文献

[1] 刘书铭, 李琼林, 陈栋新, 等. 中高压配电网非线性用户的电能质量特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 150-155.
LIU Shuming, LI Qionglin, CHEN Dongxin, et al. Study of power quality characteristics of nonlinear electric user in medium-high voltage distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 150-155.

[2] 杨志栋, 刘一, 张建华, 等. 北京 10 kV 配网合环试验与分析[J]. 中国电力, 2006, 39(3): 66-69.
YANG Zhidong, LIU Yi, ZHANG Jianhua, et al. Loop closing examination and analysis on Beijing 10 kV distribution network[J]. Electric Power, 2006, 39(3): 66-69.

[3] 于建辉, 周浩, 陆华. 杭州 10 kV 配电网合环问题的研究[J]. 机电工程, 2007, 24(10): 54-57.
YU Jianhui, ZHOU Hao, LU Hua. Research on Hangzhou 10 kV distribution network closing loop operation[J]. Mechanical and Electrical Engineering Magazine, 2007, 24(10): 54-57.

[4] 王辉东. 基于国际标准的配电网改造评估研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
WANG Huidong. Research on distribution network planning and assessment based on international standards [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.

[5] 刘莎, 王承民, 黄湛华, 等. 考虑配电网馈线可用容量的负荷点可靠性区间分析[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(12): 50-55.
LIU Sha, WANG Chengmin, HUANG Zhanhua, et al. Interval method for the reliability evaluation of load point with consideration of the available capacity of distribution network feeders[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(12): 50-55.

[6] 徐青山, 刘中泽, 杨永标, 等. 改进的配电网三相潮流计算方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(9): 23-29.
XU Qingshan, LIU Zhongze, YANG Yongbiao, et al.

Improved method of distribution network three-phase power flow calculation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(9): 23-29.

[7] 李罗, 雷颖, 魏玲燕, 等. 配电用复合无功功率补偿装置原理分析及试验方法研究[J]. 高压电器, 2014, 50(1): 107-118.
LI Luo, LEI Ying, WEI Lingyan, et al. Principle analyze and test method of complex reactive power compensation equipment for power distribution system[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(1): 107-118.

[8] 马丽叶, 卢志刚, 胡华伟. 基于区间数的城市配电网经济运行模糊综合评价[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 163-171.
MA Liye, LU Zhigang, HU Huawei. A fuzzy comprehensive evaluation method for economic operation of urban distribution network based on interval number[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 163-171.

[9] 许丹, 唐巍. 基于区域可达性分析的复杂配电网可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 172-178.
XU Dan, TANG Wei. Reliability evaluation of complex distribution networks based on regional accessibility analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(6): 172-178.

[10] 范天明, 张祖平. 中国配电网发展战略相关问题研究[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 95-100.

[11] 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.
WU Zhenhui, PENG Xiaotao, SHEN Yangwu, et al. Study on a loop power supply model and its loop-close operation mode for distribution power[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 57-63.

[12] 郭雪丽, 齐昌宵, 史洪彬. 关于城市配网合环操作的研究[J]. 电气应用, 2012, 31(23): 18-24.
GUO Xueli, QI Changxiao, SHI Hongbin. Research on loop closing operation in city distribution network[J]. Electrotechnical Application, 2012, 31(23): 18-24.

[13] 葛少云, 李晓明. 基于戴维南等值的配电网合环冲击电流计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(6): 124-127.
GE Shaoyun, LI Xiaoming. Study on surge current due to closing loop in distribution network based on Thevenin's equivalent[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2007, 19(6): 124-127.

[14] 余娟, 颜伟. 配电网合环网络模型及其馈线电流的计算[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(25): 76-81.
YU Juan, YAN Wei. The model of the closed loop distribution network and the current calcultion of its feeders[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(25): 76-81.

[15] 顾晨, 乐秀璠, 张晓明. 基于改进前推回代法的弱环配电网三相潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 160-164.
GU Chen, LE Xiufan, ZHANG Xiaoming. Three-phase power flow method for weakly meshed distribution systems based on modified back/forward sweep method[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 160-164.

[16] 张立梅, 唐巍. 计及分布式电源的配电网前推回代潮流计算[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 123-130.
ZHANG Limei, TANG Wei. Back/forward sweep power flow calculation method of distribution networks with DGs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 123-130.

[17] 肖飞, 吕飞鹏. 基于区间理论的数字化保护系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 142-146.
XIAO Fei, LÜ Feipeng. Reliability analysis of digital protection system based on interval theory[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 142-146.

[18] 刘宝碇, 赵瑞清. 不确定数学规划方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

收稿日期：2014-08-12；　修回日期：2014-10-22

作者简介：

冯欣桦(1976-)，男，高级工程师，主要研究方向为电力设备运行与控制；

黎洪光(1964-)，男，高级工程师，主要研究方向为电力设备运行与检修；

郑　欣(1982-)，男，硕士，工程师，主要研究方向为电力设备运行与控制。

(编辑　魏小丽)