基于分布式发电和柔性负荷的配电网合环电压综合调节方法研究

王旭东

（中国核电工程有限公司郑州分公司核工程研究设计所，河南 郑州 450052）

摘要：针对日益复杂的配电网结构所造成合环困难的问题，提出一种配电网合环电压综合调节方法。该方法对配电网合环开关两侧接入分布式发电和柔性负荷的不同应用场景进行研究，通过改变分布式发电和柔性负荷的接入功率，调节合环开关两侧的电压，实现配电网合环。首先，在保证合环开关两侧节点以外的电压不超过自身允许值的情况下，通过调节分布式发电的接入功率使两侧的电压满足合环开关闭合的条件；其次，若调节分布式发电的接入功率不能满足合环条件或造成其他节点电压超过自身允许的范围值，则通过调节柔性负荷，改变负荷总功率使合环开关两侧电压满足合环条件；最后，以与柔性负荷和光伏发电等效的分布式发电接入配电网为例，搭建Matlab/Simulink仿真模型，仿真结果验证了所提方法的可行性。

关键词：配电网；合环电压；分布式发电；柔性负荷

Comprehensive regulation method study of distribution network closed-loop voltage based on distributed generations and flexible loads

WANG Xudong

(Nuclear Engineering Research and Design Department, Zhengzhou Branch China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Since increasingly complex grid structures of distribution network cause the problem of closed-loop difficulty for distribution network, a comprehensive method that is used to regulate distribution network closed-loop voltage is given. According to the given method, DG and FL are linked up to both sides of closed-loop switch in distribution network, respectively. Bilateral voltages of closed-loop switch are regulated through changing output power of DG and input power of FL, distribution network can be smoothly closed loop. Firstly, voltages of closed-loop switch both sides are changed through regulating the output power of DG which makes voltage of both sides fulfil closed-loop conditions and other nodes voltages in themselves allowable values. Secondly, if voltage of closed-loop switch both sides can not fulfil the closed-loop conditions or other nodes voltages are exceeded themselves allowable values through regulating the output power of DG, FL is regulated to change total power of loads which will make voltage of both sides fulfil the closed-loop conditions. Lastly, in order to verify feasibility of proposed method, taking FL and DG which is equivalent photovoltaic generation as accessing to distribution network for example, Matlab/Simulink simulation model is presented. The results show that proposed methods are effective.

Key words: distribution network; closed-loop voltage; distributed generation; flexible load

10#技术版.indd 76 2019/10/11 16:32

0 引言

在我国，中压配电网大都采用闭环接线、开环运行的方式供电[1]，通过停电倒负荷进行线路的检修维护，此方式大大降低了供电的可靠性。为了满足用户对持续供电日益苛刻的需求，通过对配电网执行合环操作，实现不停电方式下用电负荷的转移已成为配电网未来重要的运行模式。

目前，国内外对配电网合环运行已进行了多方面的研究。文献[2]针对分布式电源不断接入配电网，以*PV*型DG为例，提出一种有效解决含*PV*节点的配电网合环潮流计算方法。文献[3]提出了以支路功率为变量的基于叠加原理和前推回代法的两阶段算法，用于计算配电网合环潮流。文献[4]给出了一种基于输配电网相结合的配电网合环冲击电流计算实用化方法，提出了公共节点及公共节点对的概念，并通过实例验证了所提方法的可行性。文献[5-6]指出合环点两侧的电压值、相角差和参与合环的母线对系统短路阻抗均会对合环是否成功造成影响。文献[7-8]研究了通过相关措施降低合环电压差以降低合环电流，实现电网的顺利合环。文献[9]指出合环时的电流主要与合环电压幅值差和相角差有关。上述文献大都从合环电流和合环电压调节方面进行研究，以提高配电网合环成功的可能性。

随着分布式发电（Distributed Generation，DG）[10]并网渗透率的不断提高和柔性负荷（Flexible Loads，FL）[11]的急剧增加，为配电网电压调节提供了新的手段。为此，本文基于DG和FL所具有的功能特点，研究其用于配电网合环电压的调节方法。该方法主要通过调节合环点DG的并网功率和负荷功率，使合环点两侧的电压满足合环条件，实现配电网的合环运行和对重要负荷的不间断供电。

1 配电网合环电压调节因素分析

配电网运行过程中，由于负荷功率、电源电压和运行方式的变化，使得各部分的电压处于动态变化中，从而常常需要调节合环点两侧的电压才能实现顺利合环。

当配电网系统额定电压恒定时，负荷电压偏差涉及系统传输的有功功率与综合电阻的乘积、系统传输的无功功率与综合电抗的乘积两方面的因素，如式（1）所示。

$$\Delta \boldsymbol{U}=\frac{P_{\mathrm{L}}R+Q_{\mathrm{L}}X}{\boldsymbol{U}_{\mathrm{N}}} \tag{1}$$

式中，$\Delta \boldsymbol{U}$为负荷母线处的电压损失；$\boldsymbol{U}_{\mathrm{N}}$为系统额定电压；$P_{\mathrm{L}}$、$Q_{\mathrm{L}}$分别为负荷的总有功功率和总无功功率；$R$、$X$分别为综合电阻和电抗。

由式（1）可得负荷母线处合环点接入DG时的实际电压为

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{h}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{N}}-\frac{(P_{\mathrm{L}}-P_{\mathrm{DG}})R+(Q_{\mathrm{L}}-Q_{\mathrm{DG}})X}{\boldsymbol{U}_{\mathrm{N}}} \tag{2}$$

式中，P_{DG}、Q_{DG}分别为DG接入配电网的有功功率和无功功率。

由于配电网合环后的电流由合环前的初始电流和合环时两侧电压差产生的冲击电流组成[12]，由式（2）可知，在配电网综合阻抗不变的情况下，通过调节负荷功率和合环点DG的接入功率两个因素，可改变合环点两侧的电压，降低合环后的电流对配电网设备造成的影响，实现配电网合环运行。

2 基于DG的合环电压调节策略研究

DG接入配电网，使配电网变为多电源的供电系统，改变了配电网潮流的大小和方向[13-15]，从而会使配电网各节点的电压增大或减小，因此通过改变配电网合环点DG的接入功率，即可实现对合环电压的调节。

本处以图1所示含有DG的配电网系统为例，研究合环电压调节策略。

图1中，配电网通过输电线路LS向负荷供电，合环开关两侧分别接入DG。当配电网需要合环运行时，若合环开关两侧的电压矢量差$\Delta \boldsymbol{U}_{\mathrm{h}}(\boldsymbol{U}_{\mathrm{h}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{h1}}-\boldsymbol{U}_{\mathrm{h2}})$满足合环的条件，即$\Delta \boldsymbol{U}_{\mathrm{h}}\leqslant\Delta \boldsymbol{U}_{\mathrm{h允}}$，则合环开关允许闭合；若$\Delta \boldsymbol{U}_{\mathrm{h}}$不满足合环的条

10#技术版.indd 77 2019/10/11 16:32

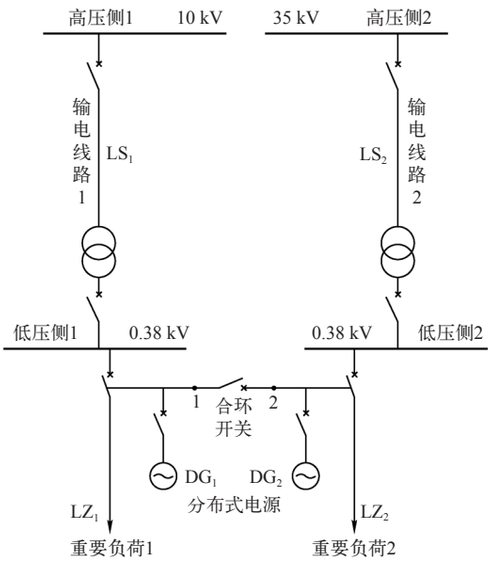


图1 含DG的配电网架构

Fig. 1 Structure of containing DG network

件，即$\Delta \boldsymbol{U}_{\mathrm{h}} > \Delta \boldsymbol{U}_{\mathrm{h允}}$，则在合环开关以外节点电压均在自身允许值范围内的情况下，以任何一侧电压为基准，调节DG_1或DG_2的接入功率直至$\Delta \boldsymbol{U}_{\mathrm{h}} \leqslant \Delta \boldsymbol{U}_{\mathrm{h允}}$。上述调节流程如图2所示。

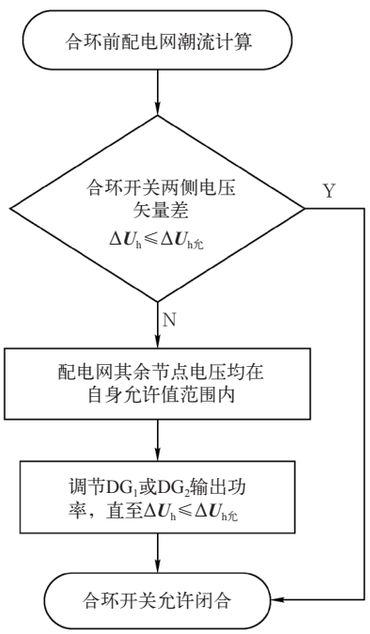


图2 基于DG的合环电压调节流程

Fig. 2 Closed-loop voltage regulation process based on DG

由图2可知，基于DG调节合环点两侧电压时，合环前计算配电网的潮流，根据合环点和其余节点电压条件判断是否允许合环，若不允许则调节DG_1或DG_2的接入功率实现合环运行。

3 基于FL的合环电压调节策略研究

随着储能、电动汽车等双向可控负荷在电力负荷中的比重不断上升，以及FL所具有自由投切和功率调节灵活的特性，因此通过调节FL的接入功率，改变需求侧负荷总功率，可实现对接入点电压的调节。

本处以图3所示含有FL的配电网系统为例，研究合环电压调节策略。

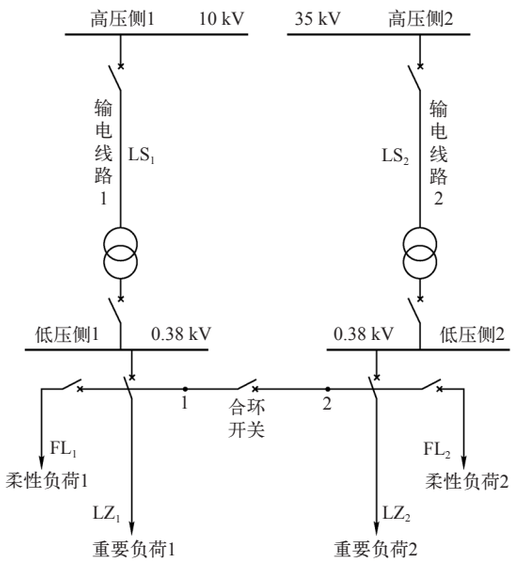


图3 含FL的配电网架构

Fig. 3 Structure of containing FL distribution network

图3中，合环开关两侧分别接入FL，当配电网需要合环运行时，若$\Delta \boldsymbol{U}_{\mathrm{h}} \leqslant \Delta \boldsymbol{U}_{\mathrm{h允}}$，则允许合环开关闭合；若$\Delta \boldsymbol{U}_{\mathrm{h}} > \Delta \boldsymbol{U}_{\mathrm{h允}}$，则在合环开关以外节点电压均在自身允许值范围内的情况下，以任何一侧电压为基准，调节FL_1或FL_2的功率直至$\Delta \boldsymbol{U}_{\mathrm{h}} \leqslant \Delta \boldsymbol{U}_{\mathrm{h允}}$。上述调节流程如图4所示。

由图4可知，基于FL调节合环点两侧电压时，合环前对配电网的潮流进行计算，根据合环电压和其余节点电压条件判断是否允许合环，若不允许则通过调节FL_1或FL_2的接入功率实现合环运行。

10#技术版.indd 78 2019/10/11 16:32

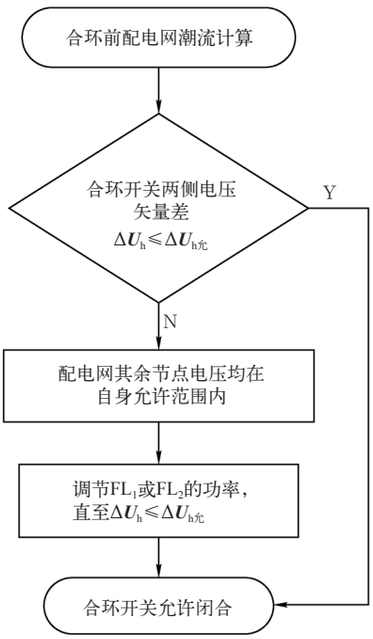


图4 基于FL的合环电压调节流程

Fig. 4 Closed-loop voltage regulation process based on FL

4 基于DG和FL的合环电压调节策略研究

由于DG和FL均具有灵活可调的特性，因此将DG和FL所具有的优点相结合，可实现对合环电压的综合调节。

本处以图5所示含DG和FL的配电网系统为例，研究合环电压调节策略。

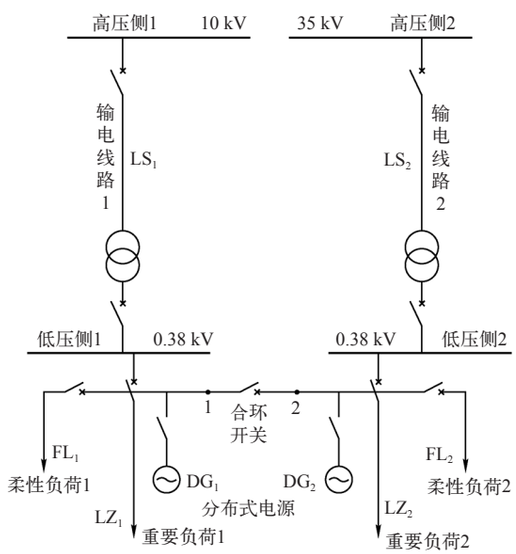


图5 含DG和FL的配电网架构

Fig. 5 Structure of containing DG and FL distribution network

图5中，配电网合环开关两侧分别接入DG和FL，当配电网需要合环运行时，若$\Delta U_h \leqslant \Delta U_{h允}$，则允许合环开关闭合；若$\Delta U_h > \Delta U_{h允}$，为了尽可能多地利用可再生能源进行发电，在合环开关以外节点电压均在自身允许值范围内的情况下，以任何一侧电压为基准，调节DG_1或DG_2的接入功率直至$\Delta U_h \leqslant \Delta U_{h允}$；若通过调节$DG_1$或$DG_2$的输出功率不能实现$\Delta U_h \leqslant \Delta U_{h允}$，则调节$FL_1$或$FL_2$的接入功率直至$\Delta U_h \leqslant \Delta U_{h允}$。上述调节流程如图6所示。

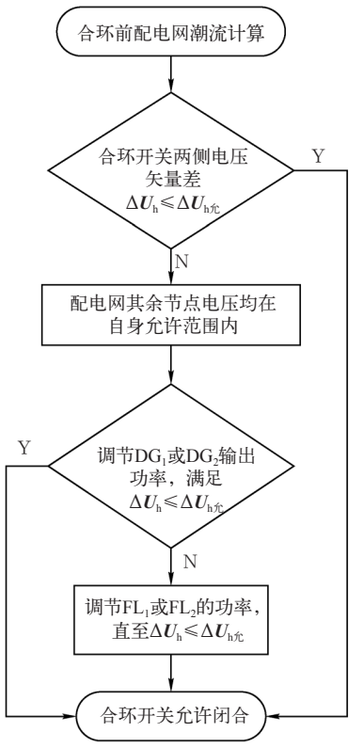


图6 基于DG和FL的合环电压调节流程

Fig. 6 Closed-loop voltage regulation process based on DG and FL

由图6可知，基于DG和FL调节合环点两侧电压时，合环前对配电网的潮流进行计算，根据合环电压和其余节点电压条件判断是否允许合环，若不允许则首先调节DG_1或DG_2的接入功率，其次调节FL_1或FL_2的接入功率实现合环运行。

5 算例仿真

为验证所提方法的可行性，限于篇幅，

10#技术版.indd 79 2019/10/11 16:32

本处以FL和光伏发电等效的DG接入配电网为例，主要基于合环开关两侧电压的幅值，搭建如图7所示的Matlab/Simulink仿真模型，其中LS的单位电阻和电抗分别为：R=0.17 Ω/km、L=0.12 mH/km，相关的初始仿真参数如下表所示。

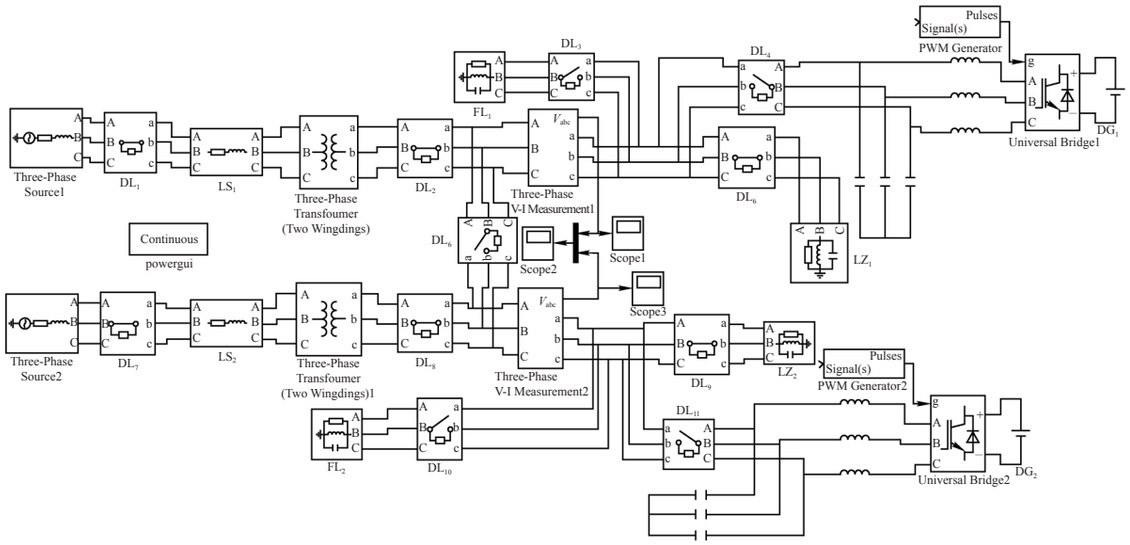


图7　配电网合环电压调节策略仿真模型

Fig. 7 Simulation model of regulation strategy based on distribution network closed-loop voltage

表　配电网系统初始参数

Tab. Initial parameters of distribution network system

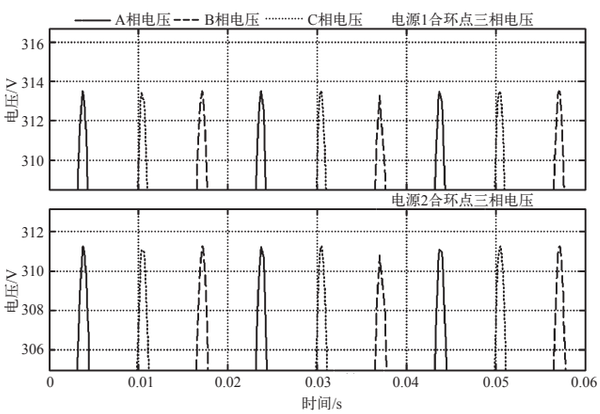
电源	电源电压/kV	线路长度/km	变压器电压比	LZ功率/kW	DG初始电压/V	FL初始功率/kW
1	10.05	10	10/0.4	700	600	100
2	36	15	35/0.4	6 000	800	200

5.1　基于DG的合环电压调节策略仿真

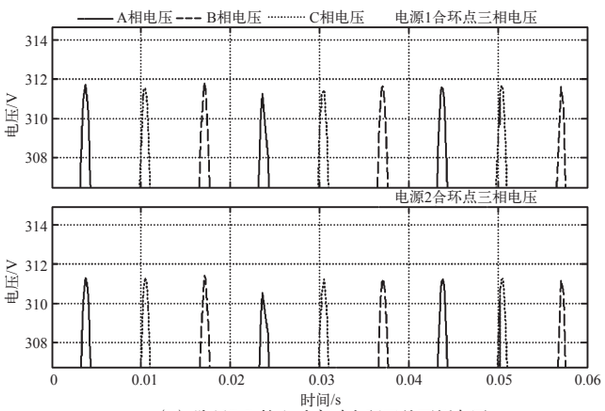
本处以图1所示架构为例，验证所提出的电压调节策略。当合环开关处于分闸时，电源1的电压由10.05 kV变为10.1 kV，而电源2电压不变，合环开关两侧的电压如图8a所示；通过降低DG_1或升高DG_2的电压，改变接入配电网的功率，得到图8b、图8c的三相电压。由图8b、图8c可知，此时合环开关两侧电压满足合环的条件。

5.2　基于FL的合环电压调节策略仿真

本处以图3所示配电网架构为例，验证所提出的合环电压调节策略。当合环开关处于分闸

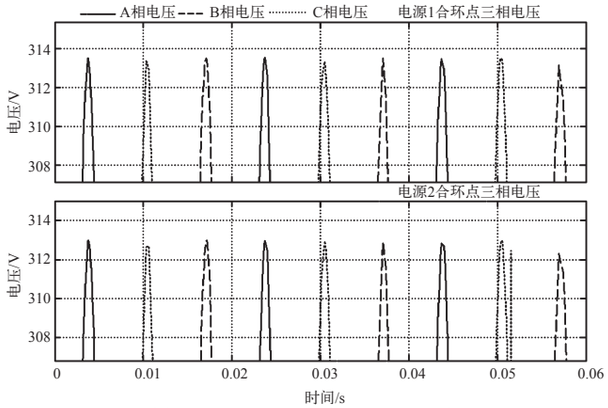


（a）电源1电压变化而电源2电压不变时合环开关两侧电压



（b）降低DG_1接入功率时合环开关两侧电压

10#技术版.indd 80　2019/10/11 16:32

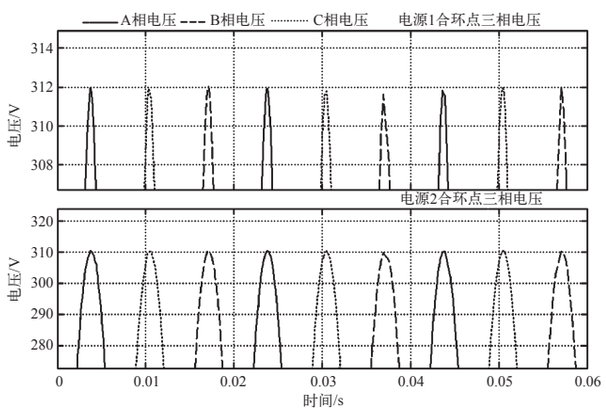


（c）增大DG_2接入功率时合环开关两侧电压

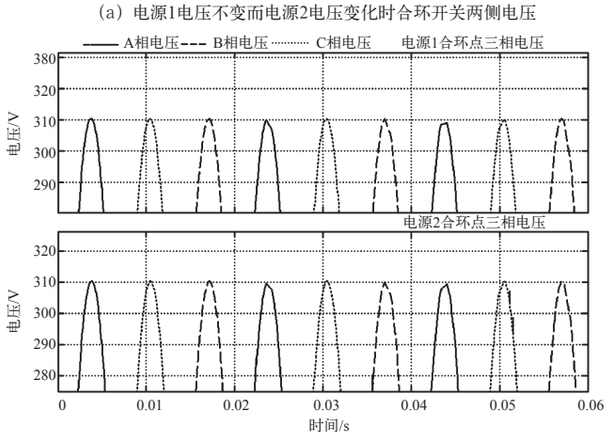
图8 基于DG的合环电压调节策略仿真结果

Fig. 8 Simulation results of closed-loop voltage based on DG

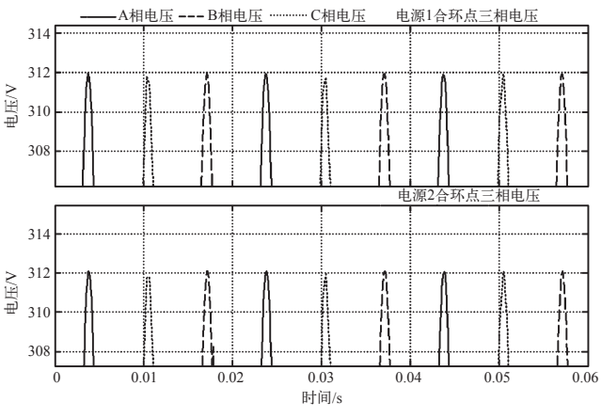
状态，电源2的电压由36 kV变为35.8 kV，而电源1电压不变时，合环开关两侧电压如图9a所示；通过增大FL_1或降低FL_2的接入功率，得到图9b、图9c所示的三相电压。由图9b、图9c可知，此时合环开关两侧电压满足合环的条件。



（a）电源1电压不变而电源2电压变化时合环开关两侧电压



（b）增大FL_1接入功率时合环开关两侧电压



（c）降低FL_2接入功率时合环开关两侧电压

图9 基于FL的合环电压调节策略仿真结果

Fig. 9 Simulation results of closed-loop voltage based on FL

5.3 基于DG和FL的合环电压调节策略仿真

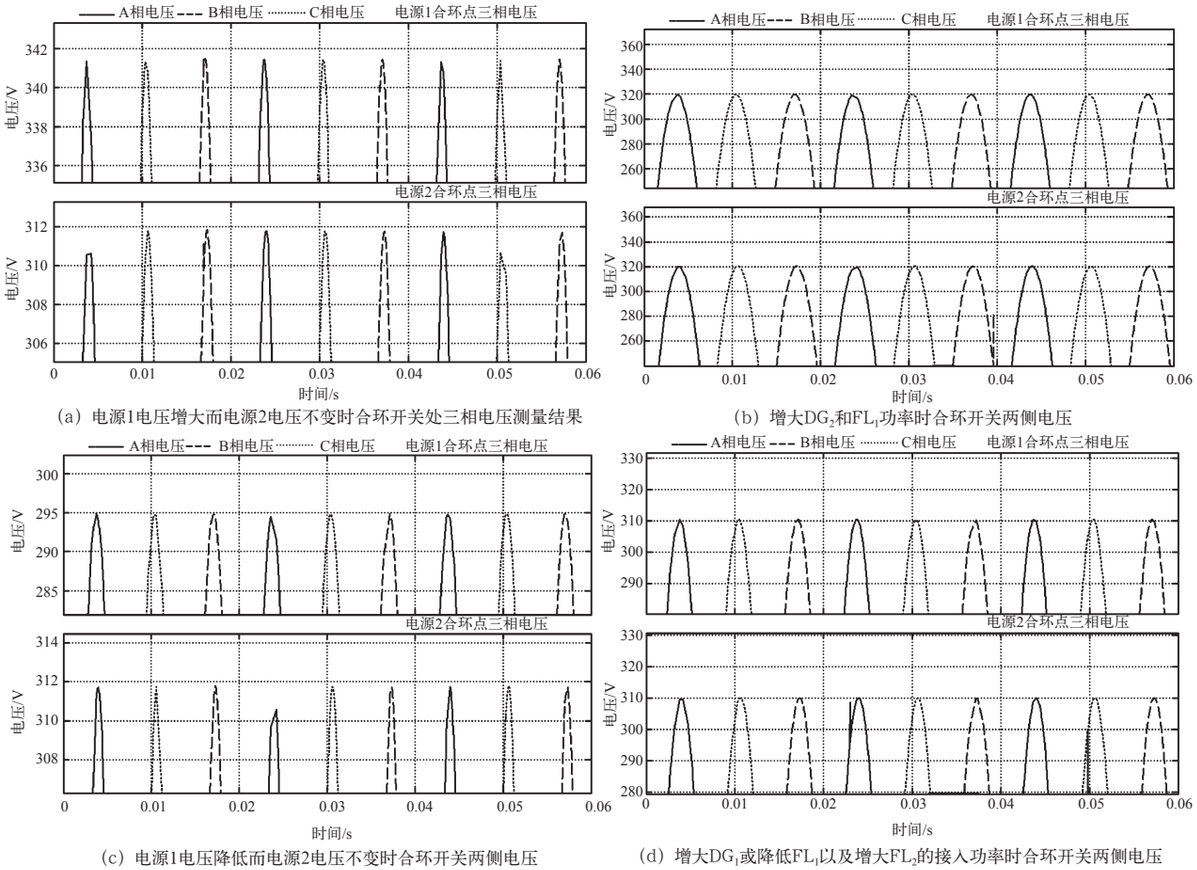
本处以图5所示配电网架构为例，验证所提出的合环电压调节策略。当合环开关处于分闸状态，若电源1的电压由10.05 kV变为11 kV而电源2电压不变时，合环开关两侧的电压如图10a所示；通过增大DG_2或FL_1的接入功率，得到图10b所示的三相电压；若电源1的电压由10.05 kV变为9.5 kV而电源2电压不变时，合环开关两侧的电压如图10c所示；通过增大DG_1或降低FL_1以及增大FL_2的接入功率，得到图10d所示的三相电压。由上述仿真结果可知，调节相关功率后，合环开关两侧的电压均能满足合环的条件。

6 结束语

通过分析影响配电网合环电压的因素，结合DG和FL可以灵活调节的优点，分别研究了不同应用场景下合环电压的调节策略。根据仿真结果可知，通过调节DG和FL的功率，能够改变合环开关两侧的电压，实现配电网的合环运行。

由于DG具有随机性、波动性和分散性等特点，而FL日趋呈现多样性，因此如何充分发挥各自的优点，实现DG和FL的互补协调，以提高配电网合环成功的概率，满足电力用户更苛刻的供电需求，还需要进一步的研究。

10#技术版.indd 81 2019/10/11 16:32



（a）电源1电压增大而电源2电压不变时合环开关处三相电压测量结果

（b）增大DG_2和FL_1功率时合环开关两侧电压

（c）电源1电压降低而电源2电压不变时合环开关两侧电压

（d）增大DG_1或降低FL_1以及增大FL_2的接入功率时合环开关两侧电压

图10　基于DG和FL的合环电压调节仿真结果

Fig. 10 Simulation results of closed-loop voltage based on DG and FL

参考文献

[1] 肖辉耀，高可夫．10 kV配电网合环的分析与应用[J]．电气应用，2015，34(11)：18-23.
XIAO Huiyao，GAO Kefu．Analysis and application of 10 kV distribution network closed-loop [J]．Electrotechnical Application，2015，34(11)：18-23.

[2] 胡晓松，张殷，谢光彬，等．含PV节点的配电网合环潮流算法[J]．电力系统保护与控制，2015，43(24)：8-12.
HU Xiaosong，ZHANG Yin，XIE Guangbin，et al．A loop closing power flow calculation algorithm of distribution network with PV nodes[J]．Power System Protection and Control，2015，43(24)：8-12.

[3] 王秀云，杨劲松，熊谦敏，等．一种配电网合环实用潮流算法[J]．电力系统保护与控制，2009，37(6)：23-26.
WANG Xiuyun，YANG Jinsong，XIONG Qianmin，et al．A practical algorithm of load flow calculation for loop distribution networks[J]．Power System Protection and Control，2009，37(6)：23-26.

[4] 陈彬，黄吉，赵辉，等．基于输配电网结合的配电网合环冲击电流实用方法[J]．电气应用，2014，33(13)：90-93.
CHEN Bin，HUANG Ji，ZHAO Hui，et al．Practical methods based on distribution network closed-loop impulse current of transmission and distribution network integration[J]．Electrotechnical Application，2014，33(13)：90-93.

[5] 李江华．浅析10 kV配网合环产生环流的原因及预防措施[J]．电网技术，2006，30(S1)：199-201.

10#技术版.indd 82　2019/10/11 16:32

LI Jianghua. Simple analysis of the reason and protective step of 10 kV distribution network causing circumfluence[J]. Power System Technology, 2006, 30(S1): 199-201.

[6] 邹俊雄，周冠波，付轲，等. 10 kV配网合环转电计算模型与试验分析[J]. 电力系统保护与控制，2010，38(8)：144 -148.
ZOU Junxiong, ZHOU Guanbo, FU Ke, et al. Electromagnetic loop closing calculation model and experimental analysis on 10 kV distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(8): 144-148.

[7] 夏翔，熊军，胡列翔，等. 地区电网的合环潮流分析与控制[J]. 电网技术，2004，28(22)：76-80.
XIA Xiang, XIONG Jun, HU Liexiang, et al. Analysis and control of loop power flow in regional power network[J]. Power System Technology, 2004, 28(22): 76-80.

[8] CHEN Tsai-Hsiang, HUANG Wei-Tzer, GU Jyh-Cherng, et al. Feasibility study of upgrading primary feeders from radial and open-loop to normally closed-loop arrangement[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1308-1316.

[9] 汲亚飞，赵江河. 辐射型配电网合环稳态电流计算方法研究[J]. 电力系统保护与控制，2009，37(12)：15-19.
JI Yafei, ZHAO Jianghe. Calculation of the loop closing steady-state current in radial power distribution network [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(12): 15-19.

[10] 刘慧珍，巩晓昕，刘艳，等. 北京电网多元分布式电源的准入容量计算[J]. 电气应用，2015，34(增刊1)：211-215.
LIU Huizhen, GONG Xiaoxin, LIU Yan, et al. Access capacity calculation of pluralistic distributed generations about Beijing grid [J]. Electrotechnical Application, 2015, 34(Sup1): 211-215.

[11] 李威，李庚银，葛磊蛟，等. 基于需求响应的负荷特性建模和优化控制方法研究[J]. 电气应用，2015，34(21)：18-23.
LI Wei, LI Gengyin, GE Leijiao, et al. Research based on load characteristics modeling and optimization control methods of demand response[J]. Electrotechnical Application, 2015, 34(21): 18-23.

[12] 汲亚飞，赵江河. 辐射型中压配电网合环分析系统的设计与研究[J]. 电力系统保护与控制，2009，37(11)：58-61.
JI Yafei, ZHAO Jianghe. Design and research on the loop closing operation analysis system medium voltage in radial distribution network [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(11): 58-61.

[13] AHLSTROM M L, ZAVADIL R M. The role of wind forecasting in grid operations and reliability[C]. Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Asia and Pacifie, 2005: 1-5.

[14] 杨旭英，段建东，杨文宇，等. 含分布式发电的配电网潮流计算[J]. 电网技术，2009，33(18)：139-142.
YANG Xuying, DUAN Jiandong, YANG Wenyu, et al. Power flow calculation based on power losses sensitivity for distribution system with distributed generation [J]. Power System Technology, 2009, 33(18): 139-142.

[15] LISERRE M, SAUTER T, HUNG J Y. Future energy systems: integrating renewable energy sources into the smart power grid through industrial electronics[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2010, 4(1): 18-37.

作者简介



王旭东

王旭东（1981－），男，硕士研究生，高级工程师，主要研究方向为电力系统规划、配电网可靠性等。

(收稿日期：2019－02－21)EA

10#技术版.indd 83 2019/10/11 16:32