

配电网电动汽车协调有序充电调度策略研究

李书雄 林明星 余兴祥

(四川省电力公司甘孜公司 四川 康定 626300)

摘要: 针对在非协调无序充电方式下,电动汽车充电会给配电网带来一些功率损耗和电压偏移、增大负荷峰谷差等问题,构建了一种协调性有序充电调度策略。首先分析了电动汽车充电方式对配电网的影响,揭示了配电网中协调有序充电的必要性;然后,从安全性和经济性两方面出发,同时以最小化配电网功率损耗和减小电网等效负荷峰谷差为目标,建立了各个节点上电动汽车的最优充电调度策略。最后,采用遗传算法进行仿真求解,验证了该协调性有效充电策略的合理性和有效性。

关键词: 电动汽车; 配电网; 协调性有序充电; 遗传算法

Abstract: Aiming at the power losses, voltage deviation and increasing differences of load peak and valley in distribution network caused by disorderly non-coordinated charging of electric vehicle, a dispatching strategy of orderly coordinated charging is established. Firstly, the effect of electric vehicle charging methods on distribution network is analyzed, and the necessity of orderly coordinated charging in distribution network is described. From the aspects of security and economy, the optimal charging dispatching strategy on each node is established taking minimizing the power losses of distribution network and decreasing the differences of load peak and valley as the goal. Finally, the rationality and validity of coordinated charging strategy are verified by the simulation with genetic algorithm.

Key words: electric vehicle; distribution network; orderly coordinated charging; genetic algorithm

中图分类号: TM715 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)04-0040-06

0 引言

近年来,全球对节能减排的关注显著提升,对清洁能源的越来越重视。传统的燃料汽车不仅大量消耗着日益减少、存量有限的化石燃料,并且排放大量的温室气体,从而对全球的环境和气候造成极大的负面影响。在此背景下,电动汽车成为当今汽车发展的必然趋势。其中,对电动汽车充电方式的研究是其中一个重要的课题^[1,2]。

目前,国内外均采用非协调性无序充电方式对电动汽车进行充电,每辆电动汽车的充电曲线都是由各自的使用者决定的,使用者可以决定自己汽车充电的时间和功率。该充电方式没有使电网的利用达到最优化,电网的功率损耗和电能质量都有很大的提升空间,并且在该无序充电方式下,进一步加大了电网负荷峰谷差。

针对以上问题,国内外学者作了一定研究。文献[3]提出了一种平滑等效负荷波动的有序充电方

式,但未考虑涉及对整个配电网损耗等方面的影响;文献[4]建立了一种考虑功率损耗的协调性充电方式,但仅从定性上进行了分析;文献[5]详细分析了协调性充电方式对电网损耗、电压偏移等的影响,建立了一种提高配电网电能质量的充电方式,但未考虑对系统等效负荷峰谷差带来的巨大影响。

综上所述,分析了一种新的电动汽车充电方式——协调性充电调度策略。该充电方式从经济性和安全性两方面出发,使汽车的充电和电网的利用达到最优,从而使网络的功率损耗降到最小,同时减小等效负荷峰谷差。最后,通过IEEE标准配电网33母线测试系统验证了该模型的有效性。

1 电动汽车对配电网的影响

电动汽车在充电时会消耗大量电能,从而大大增加峰值负荷,对电网造成不利的影

是电动汽车的集聚效应,也即所有电动汽车被安排在充电站进行充电。从配电网运行者的角度考虑,电动汽车充电时电网的功率损耗关系到经济收益,因此,应该使电网的功率损耗减小到最小。另外,电动汽车充电时会造成负荷大量增加,因此,避免变压器和馈线的过负荷也是必须考虑的问题。在电动汽车充电期间,除了功率损耗之外,电能质量(包括电压分布、电力电量不平衡、谐波等问题)以及等效负荷峰谷差也是配电网运行者和用户关心的重要问题。过大的电压偏移以及峰谷差会使电力系统的可靠性受到威胁。

在深夜让电动汽车充电能够增加基荷发电站的负荷,也能平滑日负荷曲线,并且避免发电机的启动,从而提高整体能效。如果让车主完全按照自己的意愿给电动汽车充电,随意地确定充电时间和充电功率,且配电网运行者不对所有电动汽车的充电时间和充电功率加以协调,那么配电网将会受到极大的影响。因为,如果不经过协调,大量电动汽车可能集中在同一时间段进行充电,造成该时段峰值负荷大大增加,从而增加功率损耗,加剧电压偏移,降低配电网运行的经济性与可靠性。

2 协调性有序充电方式优化模型

2.1 协调性有序充电方式基本原理

在协调性有序充电方式下,电动汽车使用者不能控制汽车的充电功率随时间变化的曲线,汽车的充电调度策略曲线由配电网中一个专门的控制系统来控制。这个控制系统的控制目标是使配电网的功率损耗以及负荷峰谷差最小,该系统的控制依据是根据最优化方法计算出的各个汽车最优充电功率随时间变化的曲线。在该协调性充电方式下,各个充电力汽车之间存在着某种程度上的配合关系,它们的配合使配电网中的功率损耗最小,进而使电能质量得到相应提高,同时降低了系统等效负荷峰谷差。

2.2 电动汽车充电负荷模型

集中研究电动汽车充电的集群效应,即大量电动汽车在充电站接入后对配电网的影响,假设每辆电动汽车充电时间服从正态分布,且不受其他电动汽车影响,相互独立,因此采用蒙特卡洛模拟方法来研究电动汽车的充电行为。设第 t 时段第 k 辆电动汽车的充电功率为 $P_{k,t}$,则总的充电功率为

$$P_t = \sum_{k=1}^N P_{k,t} \quad (1)$$

式中 P_t 为第 t 时段总的充电功率; k 为电动汽车编号; t 为时段编号; N 为电动汽车总量。

2.3 目标函数

由第1节知,该协调性充电方式从经济性和安全性两个方面来进行整个配电网的优化,经济性体现在系统网损方面,安全性体现在等效负荷峰谷差方面。因此,优化目标为配电网功率损耗以及等效负荷的方差最小。目标函数为

$$\min f_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N U_{i,t} U_{j,t} G_{ij} \cos \theta_{ij,t} \quad (2)$$

$$\min f_2 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left[\sum_{i=1}^N (P_{i,t} + P_{i,t}^{load}) - \mu \right]^2 \quad (3)$$

其中 f_1 、 f_2 分别为网损和等效负荷峰谷差目标函数; T 、 N 分别为优化时段数和系统节点数; $U_{i,t}$ 为节点 i 第 t 时段的节点电压; $\theta_{ij,t}$ 为节点 i 、 j 的相角差; $P_{i,t}$ 、 $P_{i,t}^{load}$ 为节点 i 第 t 时段的充电功率和负荷功率; μ 为所有时段电网等效负荷的平均值。即

$$\mu = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N P_{i,t} + P_{i,t}^{load} \quad (4)$$

另外,由于上述两个目标函数的量纲不同,在计算过程中采用自适应权重法,并结合式(2)和式(3)将其归一转为单目标函数,得到如下形式。

$$\min f = \lambda_1 \frac{f_1 - f_1^{\min}}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} + \lambda_2 \frac{f_2 - f_2^{\min}}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} \quad (5)$$

式中 λ_1 、 λ_2 为网损和等效负荷方差目标函数的权重系数。

2.4 约束条件

(1) 充电功率约束

$$I_i P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq I_i P_{i,\max} \quad (6)$$

$P_{i,\min}$ 、 $P_{i,\max}$ 分别为节点 i 的充电器功率最小、最大限制; I_i 为节点状态量,当节点 n 有充电器时,其值为1,否则其值为0。

(2) 电池容量约束

$$C_{i,t+1} = C_{i,t} + \eta P_{i,t} \Delta t \quad (7)$$

$$C_{i,\min} \leq C_{i,t} \leq C_{i,\max} \quad (8)$$

$$C_{i,\text{start}} + \sum_{t=\text{start}}^{\text{end}} \eta P_{i,t} \Delta t = C_{i,\max} \quad (9)$$

式中, $C_{i,\min}$ 、 $C_{i,\max}$ 为电动汽车电池电量的上下限; $C_{i,\text{start}}$ 为电动汽车充电初始时刻电量; η 为充电效率; Δt 为时间间隔。式(7)和式(8)表示电量不能超过最大容量限值,也不能低于用户的最小电量需求。式(9)表示若用户要求一次性在规定时间内充满电

的约束式。

(3) 网络安全约束

$$P_i^i = \sum_{j \in i} U_{ij} U_{jt} (G_{ij} \cos \theta_{ijt} + B_{ij} \sin \theta_{ijt}) \quad (10)$$

$$Q_i^i = \sum_{j \in i} U_{ij} U_{jt} (G_{ij} \sin \theta_{ijt} - B_{ij} \cos \theta_{ijt}) \quad (11)$$

$$U_{i, \min} \leq U_{it} \leq U_{i, \max} \quad (12)$$

$$P_{ij, \min} \leq P_{ijt} \leq P_{ij, \max} \quad (13)$$

式中 $U_{i, \min}$ 、 $U_{i, \max}$ 、 $P_{ij, \min}$ 、 $P_{ij, \max}$ 分别为节点电压和支路功率的上下限。

2.5 算法求解

针对上述所建模型,采用普遍应用的遗传算法进行求解。

(1) 编码。选取各节点每个时段电动汽车充电功率作为染色体个体,进行编码。

(2) 适应度函数。按照遗传算法适应度函数要求,需要将目标函数转化为最大值问题,因此结合式

(5) 构造适应度函数 f' 。

$$f' = \lambda_1 \frac{f_1^{\max} - f_1}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} + \lambda_2 \frac{f_2^{\max} - f_2}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} \quad (14)$$

(3) 遗传操作。根据种群个体适应值,并结合潮流约束条件满足情况,执行相应遗传操作(选择、变异和交叉)。由适应度函数知 f_1 、 f_2 越小,对应的适应度函数值越大,相应个体被选择的概率越高。同时,采用较高个体适应度的单点交叉作为交叉算子。由于遗传操作(选择、交叉和变异)具有随机性,为了防止最优解在进化过程中被破坏,采取最优保留策略,直接复制到下一代,从而提高了算法收敛的可靠性。

(4) 算法流程。根据上述循环迭代过程可得协调性有序充电结果,具体流程如图1。

3 算例分析

3.1 模型参数与假设

这里 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.5$,采用 IEEE 配电网 33 母线系统进行算例分析,如图2,该母线系统是一个住户型的辐射配电网,节点与支路参数见文献[3,7]。线路阻抗的大小是根据能承受的电压偏移和网络功率损耗而确定的。随机选取这些节点中的其中一些节点,作为电动汽车的充电节点。根据统计选择三个重要的充电时段。第一个充电时段是用电高峰期(18:00~22:00),该充电时间段和晚间的峰值负荷发生的时间段是一致的。第二个充电时段是在傍晚

和夜里(23:00~6:00),该时段大多数电动汽车都在家里,更愿意在此时段充电,进而降低充电费用,并且电网负荷处于低谷阶段。第三个充电时段是上班时段(7:00~17:00),该时段通常在城市地区的小型办公室内充电。

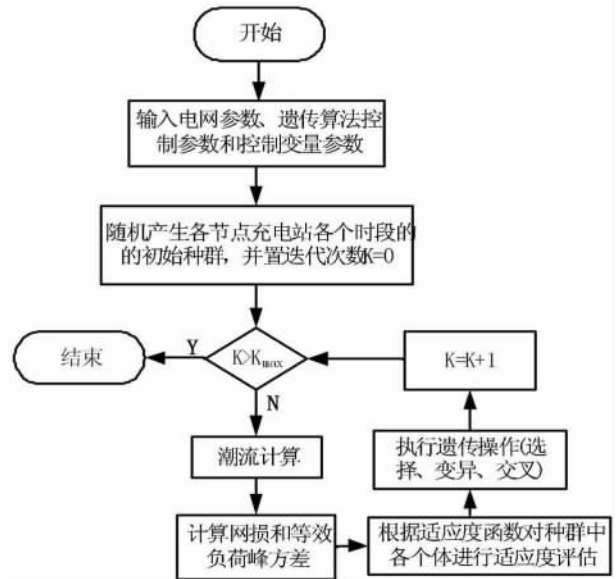


图1 算法流程图

对于电网负荷,从某地区的居民配电网历史数据中,选取一系列负荷曲线,将选取的大量日负荷曲线分为两组,一组是冬季用电负荷曲线,另一组是夏季用电负荷曲线。图3为冬季某一天单户家庭的日负荷曲线。

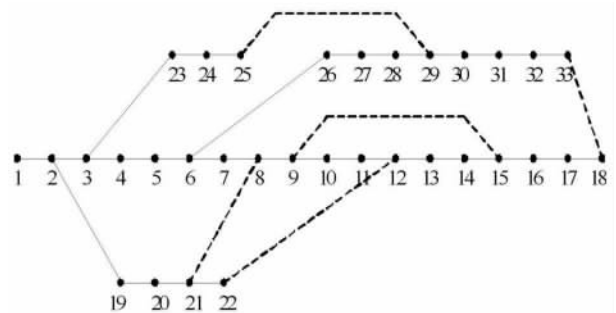


图2 IEEE 33 母线系统结构图

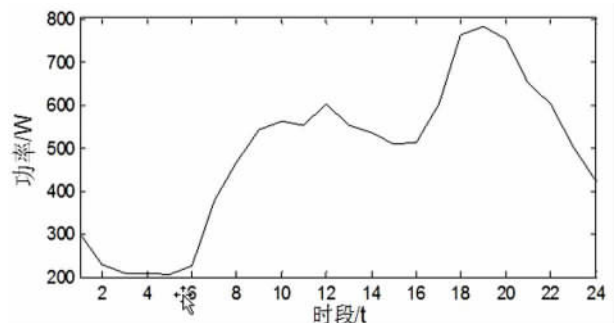


图3 冬季家庭日负荷曲线图

3.2 模型结果

算例分析了电动汽车不同接入比例下(10%、20%和30%)的系统网络损耗、电压偏移以及对等效负荷的影响。表1、表2分别为各充电时段在不同电动汽车接入比例下的系统网损和电压偏移。

表1 协调性有序充电方式下网络功率损耗占总功率的比例

充电时段	季节	电动汽车接入比例			
		0%	10%	20%	30%
18:00 ~ 22:00	夏季	1.5	1.7	2.0	2.4
	冬季	2.9	3.2	3.8	4.2
23:00 ~ 6:00	夏季	1.2	1.5	1.9	2.3
	冬季	2.4	2.9	3.5	4.1
7:00 ~ 17:00	夏季	1.0	1.4	1.8	2.5
	冬季	1.7	2.3	3.0	3.9

从表1数据可以看出,随着电动汽车接入比例的增大,配电网功率损耗也随之增大,这是由于电动汽车比例增大时,意味着整个配电网网络的总负荷增加,进而导致整个配电网网络的功率损耗也会随之增加。

表2 协调性有序充电方式下配电网最大电压偏移

充电时段	季节	电动汽车接入比例			
		0%	10%	20%	30%
18:00 ~ 22:00	夏季	3.5	4.3	5.8	6.8
	冬季	4.8	5.6	6.5	7.7
23:00 ~ 6:00	夏季	3.3	3.3	3.3	3.6
	冬季	4.2	4.2	4.3	4.3
7:00 ~ 17:00	夏季	3.0	3.4	4.2	4.9
	冬季	3.6	4.1	4.9	5.7

根据表2分析可得,协调性充电方式下,当电动汽车的比例为0%时,和电动汽车的比例为10%的电压偏移的差别不大。出现这种现象的原因是,当电动汽车的比例为0%时,最大电压偏移出现在家庭负荷的高峰时段。当电动汽车的比例为10%时,由于采用了协调性充电方式,汽车几乎都能被安排到家庭负荷的非高峰时段。这样,电动汽车的充电几乎不会明显增加高峰时段的负荷量,因此,电压偏移程度只比电动汽车比例为0%时略微高一些。当电动汽车的比例为20%时,由于充电的汽车数量增多,汽车充电时间的分布性就更强。于是,被安排到

高峰时期充电的汽车数量高于比例为0%时的情况,因而增加了高峰时期的总负荷,所以电压偏移比起比例为0%、10%时的程度高。同样的道理,当电动汽车比例为30%时,最大电压偏移的值比起0%、10%、20%都有所增高。

系统冬季某天各时段充电负荷和等效负荷曲线如图4。

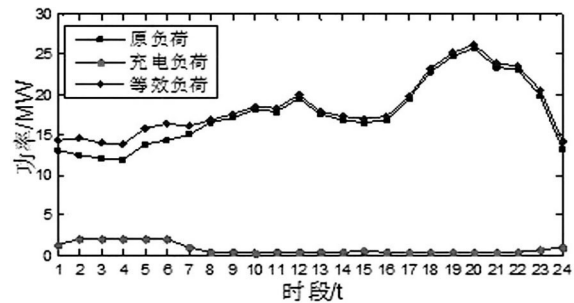


图4 协调性有序充电方式下等效负荷

3.3 模型对比分析

采用传统的非协调性自由充电模式进行算例对比分析。表3和表4为非协调性充电方式下的系统网损和电压偏移。

表3 非协调性无序充电方式下网络功率损耗占总功率的比例

充电时段	季节	电动汽车接入比例			
		0%	10%	20%	30%
18:00 ~ 22:00	夏季	1.5	1.9	2.3	2.8
	冬季	2.9	3.4	4.1	4.5
23:00 ~ 6:00	夏季	1.2	1.6	2.1	2.7
	冬季	2.4	3.0	3.7	4.5
7:00 ~ 17:00	夏季	1.0	1.6	2.0	2.8
	冬季	1.7	2.4	3.3	4.3

表4 非协调性无序充电方式下配电网最大电压偏移

充电时段	季节	电动汽车接入比例			
		0%	10%	20%	30%
18:00 ~ 22:00	夏季	3.5	4.5	5.9	7.5
	冬季	4.8	6.1	7.8	9.0
23:00 ~ 6:00	夏季	3.3	3.6	3.8	4.5
	冬季	4.2	4.5	5.2	5.7
7:00 ~ 17:00	夏季	3.0	3.5	4.3	5.1
	冬季	3.6	4.3	5.3	6.0

由上表中数据对比分析可得,由于冬季整个配电网网络负荷高于夏季,功率损耗比夏季整个配电网

网网络功率损耗稍高。

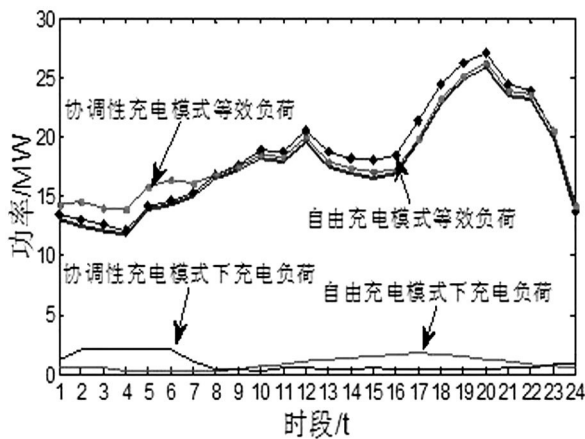


图5 不同充电方式下等效负荷对比

从图5可以看出:在自由充电模式下,采用蒙特卡洛随机模拟,车主更多地选择在上班时间(7:00~17:00)或者用电高峰期(18:00~22:00)进行随机充电,在该模式下势必会恶化电网的峰谷差,增加电网的负担。采用协调性有序充电后,将大量的充电负荷转移安排在夜间用电低谷时段(即23:00~6:00),这有效降低了负荷峰谷差,平滑了负荷曲线。

表5 相比自由无序充电协调性有序充电方式下
网络功率损耗减少比例

充电时段	季节	电动汽车接入比例			
		0%	10%	20%	30%
18:00~22:00	夏季	0	0.2	0.3	0.4
	冬季	0	0.2	0.3	0.3
23:00~6:00	夏季	0	0.1	0.2	0.4
	冬季	0	0.1	0.2	0.4
7:00~17:00	夏季	0	0.2	0.2	0.3
	冬季	0	0.1	0.3	0.4

从表5可知:①没有电动汽车充电时,协调性充电方式与非协调性充电方式下都不会对配电网的网络功率损耗造成影响;②不同充电时间段、不同的电动汽车比例的情况下,协调性充电方式比非协调性充电方式的优越性程度不同,也就是说,在不同情况下,协调性充电方式比非协调性方式充电减小的配电网功率损耗的程度不同,随着电动汽车比例的增加,协调性充电方式比非协调性方式充电的优越性更加显著,减少的网损更多。因此,采用协调性有序充电方式后,在不同电动汽车接入比例下整个配电网系统网损均有所降低,提高了电网的经济性。

从表2和表4对比以及图4可得,在同样的情

况下,电动汽车以协调性充电方式充电比非协调性充电方式充电的电压偏移量有较大幅度的减小。比如,在冬季的18:00~22:00以及23:00~6:00这两个时段,当电动汽车的比例为30%时,以协调性充电方式充电比以非协调性充电方式充电的电压偏移小1.3%和1.4%。出现这种现象的原因是,用协调性方式充电,能使各个电动汽车被安排在合理的时间充电,尽量避开高峰负荷,减小高峰负荷的增量,有效降低了负荷峰谷差,从而减小电压偏移,该充电调度策略降低了电压偏移,提高了电能质量,避免了无序自由充电下对负荷峰谷差的恶化,提高了电网的安全性。

4 结论

建立了以减小配电网功率损耗和峰谷差为目标的协调性有序充电调度策略。通过配电网33节点系统算例分析表明了该协调性有序充电调度策略能将大量的充电负荷转移安排在夜间用电低谷时段,有效地平滑了等效负荷曲线,避免了非协调性充电方式下峰值负荷的增加以及电压偏移的加剧,提高了配电网的安全性。同时,该充电策略降低了配电网功率损耗,提高了整体能效,夜间充电也能有效增加基荷发电站的负荷,提高了系统经济性。

该充电调度策略需要安装专门的控制系统,控制系统的安装会带来一定的成本,综合评估成本与整个配电网经济效益是下一步研究的内容。

参考文献

- [1] 杨孝纶. 电动汽车发展趋势及前景[J]. 汽车科技, 2007(6): 10-12.
- [2] S. G. Wirasingha, N. Schofield and A. Emadi. Plug-in Hybrid Electric Vehicle Developments in the US: Trends, Barriers, and Economic Feasibility [C]. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2008.
- [3] 黄润, 周鑫, 严正. 计及电动汽车不确定性的有序充电调度策略[J]. 现代电力, 2012, 29(3): 57-63.
- [4] 万路路, 王磊, 丁昊. 配电网电动汽车优化充电研究[J]. 华东电力, 2011, 39(12): 2049-2053.
- [5] Kristien Clement-Nyns, Edwin Haesen, Johan Driesen. The Impact of Charging Plug-in Hybrid Electric Vehicles on a Residential Distribution Grid [J]. IEEE Transactions On Power System, 2010, 25(1): 371-380.

[6] A. Anderman. The Challenge to Fulfil Electrical Power Requirements of Advanced Vehicles [J]. Journal of Power Sources, 2004, 27(1): 2-7.

[7] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.

[8] 杨秦. 混合动力汽车发展将分“三步走” [N]. 中国经济导报, 2008-12-20.

[9] Denholm P. and Short W. An Evaluation of Utility Sys-

tem Impacts and Benefits of Optimally Dispatched Plug-in Hybrid Electric Vehicles [R]. Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2006.

[10] M. Duvall and E. Knipping. Environmental Assessment of Plug-in Hybrid Electric Vehicles - Volume 1: Nationwide Greenhouse Gas Emissions [R]. EPRI, 2007.

(收稿日期: 2013-05-21)

(上接第22页)

盖一色尔古、谭家湾—南充支路脆弱; 枯大方式下, 康定、南天、沐川、资阳、桃乡、内江、雅安、泸定、石棉、九龙节点脆弱, 黄岩—达州、黄岩—广安、泸定—甘谷地、二滩—石板箐、谭家湾—南充、色尔古—茂县、福龙—叙府、甘谷地—康定、龙头石—石棉、长寿—万县支路脆弱。这些节点和支路相连的线路发生故障易导致故障向连锁故障方向纵深。综合从线路受能量冲击的大小强度和线路故障后对这个系统造成的后果两方面来定义线路的脆弱性, 更加接近实际电网的脆弱本质。

脆弱度大的节点在过负荷下对系统冲击大, 导致支路过载潮流转移的节点, 快速切除这些节点的过负荷量对系统的安全稳定起到十分重要的作用。综合脆弱度大的支路, 由于过载支路的跳闸, 必将引起系统潮流的重新分布, 其影响范围是全局的, 在过负荷保护切除支路前消除薄弱支路过载, 从而避免了连锁故障的发生。

综上所述, 要提高整个四川特/超高压电网的安全稳定水平和运行可靠性, 对这些脆弱节点和脆弱线路要加强监视控制, 采取必要的安保措施使其坚强可靠, 避免由于这些脆弱元件造成故障的连锁反应, 进而减少大规模连锁故障发生的概率。对于脆弱度大的节点, 其上的过负荷应该快速消除, 避免引起支路过载。对于脆弱度大的支路, 过载后不能让过负荷保护切除, 而应通过紧急控制迅速消除过载, 以免引起连锁故障。

4 结论与展望

四川电网具有水电资源非常丰富、比重大, 水电分布不均匀、负荷分布主要分布在川东地区, 丰水期窝电, 枯水期缺电等特点。对四川特/超高压电网脆

弱度分析表明, 四川电网具有典型的小世界网络特性, 其较小的特征路径长度和较高的聚类系数对故障的传播会起到推波助澜的作用。同时, 在不同运行方式下, 四川电网的脆弱节点和脆弱线路会发生转移, 丰大方式下主要水电输送通道较脆弱, 枯大下外购电和川内火电输送通道较脆弱, 其结果对四川电网的运行控制具有一定的参考意义。

参考文献

[1] Enquiry Committee. Report of the Enquiry Committee on Grid Disturbance in Northern Region on 30th July 2012 and in Northern, Eastern & North-eastern Region on 31st July, 2012 [R/OL]. [2012-08-16]. http://www.powermin.nic.in/pdf/GRID_ENQ_REP_16_8_12.pdf.

[2] 方俊杰. 美国“9·8”大停电对连锁故障防控技术的启示 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 1-7.

[3] 陈向宜, 陈允平, 李春艳, 等. 构建大电网安全防御体系——欧洲大停电事故的分析及思考 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 4-8.

[4] 曹一家, 陈晓刚, 孙可. 基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路辨识 [J]. 电力自动化设备, 2006, 26(12): 1-5.

[5] 陈晓刚, 孙可, 曹一家. 基于复杂网络理论的大电网结构脆弱性分析 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 138-144.

[6] 丁明, 韩平平. 加权拓扑模型下的小世界电网脆弱性评估 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 20-25.

[7] 杨可, 刘俊勇, 贺星棋, 等. 四川电网黑启动恢复控制研究及试验(一)——指导原则及电压控制 [J]. 电力自动化设备, 2010, 30(6): 100-104.

作者简介:

李燕 (1986), 女, 助理工程师, 硕士, 从事电力系统稳定分析与控制研究。

(收稿日期: 2012-06-15)