

DOI: 10.7500/AEPS20130529009

电力系统有功和无功功率充裕度评估

秦文萍¹, 王 鹏^{1,2}, 韩肖清¹, 刘志娟¹

(1. 太原理工大学电气与动力工程学院, 山西省太原市 030024; 2. 南洋理工大学电机与电力工程系, 新加坡 639798)

摘要: 无功功率与系统电压稳定及电压崩溃现象密切相关, 其对系统稳定运行具有重要意义。然而, 在传统可靠性评估中, 很少计及无功功率的影响。文中分别从有功和无功功率两个角度对电力系统可靠性进行研究。在评估中, 考虑了有功和无功功率短缺以及由于系统故障引起的电压扰动问题, 在事故后采用三级切负荷技术来确定有功和无功功率对电力系统可靠性的影响, 并找出最经济的方法来缓解网络参数越限问题。

关键词: 无功功率; 充裕度; 可靠性评估; 电压稳定性

0 引言

电压崩溃通常发生在重负荷电力系统中, 通常由负荷波动或系统故障引起, 并伴随有高无功功率需求、高无功功率损耗以及快速响应无功储备缺乏等特点^[1]。文献[2-6]的研究结果表明, 无功功率是解决系统运行中电压问题的关键, 因此应该在可靠性评估中予以考虑。

近年来, 可再生能源如太阳能和风能发电已大规模接入电力系统。由于可再生能源和系统负荷具有波动性和不确定性等特点, 使得系统电压稳定性问题变得更加复杂。高渗透率的风力发电有可能改变电力系统的不稳定模式^[7]。风力发电渗透率的提高将导致更多的无功功率需求, 如果现有电力系统不能满足其要求, 可能会导致电压不稳定。在配电系统中, 光伏功率的波动与系统抽头转换控制方案结合将会导致不可接受的电压降落^[8]。因此, 研究无功功率对接有可再生能源的电力系统可靠性的影响是非常重要的。

然而, 传统电力系统可靠性评估更关心有功功率的充裕度问题^[9-12], 无功功率对可靠性的影响还没有被深入研究。大多数可靠性评估技术中提到的可靠性指标均与充裕度有关, 如电能不足期望值(EENS)、负荷切除期望值(ELC)等。首先, 这些指标通常通过成比例地切除有功负荷来计算。其次, 这些指标不能反映由于无功功率缺乏引起的系统不

可靠问题。低压减载是解决严重电压问题的最后手段^[13]。在系统实际运行中, 为减轻系统的电压不稳定程度, 可采用同时切除有功和无功负荷的低压减载方案^[13-18]。但按现有可靠性评估技术, 很难如实反映这些调控手段对系统可靠性的影响。

文献[19]提出了一种新的可靠性评估技术, 这种技术同时考虑由于有功和无功功率电源故障引起的有功和无功功率短缺问题。无功功率电源有发电机、同步调相机、补偿装置和柔性交流输电系统(FACTS)元件等。此技术分别研究了由于无功功率短缺和有功功率短缺引发的可靠性问题。考虑了无功功率短缺及其引起的电压越限问题, 并提出了一些新的可靠性指标来表示系统可靠性中无功功率短缺的影响。

本文将无功功率对负荷节点与系统可靠性的影响与有功功率对其的影响分开讨论。研究了可靠性评估中由于系统故障引起的有功和无功功率短缺以及相应的电压越限问题, 定义了与有功和无功功率短缺有关的负荷节点可靠性指标。用三级切负荷策略代替两级切负荷策略^[19]来减轻故障后的功率短缺和网络参数越限问题, 以此来说明无功功率对系统可靠性评估的重要性, 并试图找到最经济的方法来缓解网络参数越限问题。

1 电压稳定性与可靠性的关系

在电力系统分析中, 从一个负荷节点看进去, 电力系统可以用一个等效的发电机来代替。文献[1]清晰地描述了一个无损电力系统传输到负荷节点的有功功率 P 和无功功率 Q , 负荷节点电压 V 是 P 和 Q 的函数。

收稿日期: 2013-05-29; 修回日期: 2013-08-06。

国家国际科技合作与交流专项资助项目(2010DFB63200);
山西省科技攻关项目(20120321005-02, 20130321027-01);
山西省留学人员科技活动择优资助项目。

有功功率和电压的关系通常用 PV 曲线来描述。具有恒定功率因数的 PV 曲线可以通过曲面 $V(P, Q)$ 和垂直平面 $Q = P \tan \varphi$ 相交得到, 如图 1 所示。

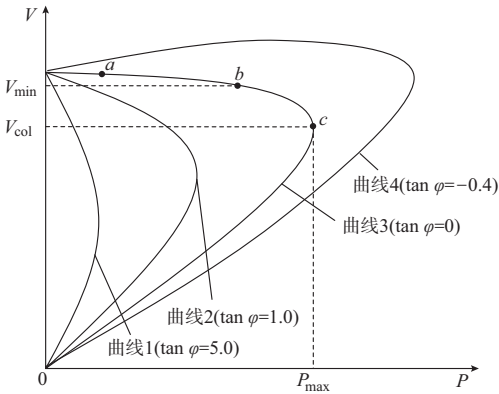


图 1 给定 Q 值下不同功率因数的 PV 曲线
Fig.1 PV curves for different power factors with a given Q

图 1 显示了 4 种不同功率因数的 PV 曲线。曲线 1, 2, 3 对应于滞后功率因数的感性负载。曲线 4 对应于超前功率因数的容性负载。由图可知, 随着功率因数增大, 在没有越过电压限制 V_{min} 时, 可以供应更多的有功负荷。对于某一 PV 曲线, 电压随着有功负荷的增加而降低, 当 P 达到其最大值时电压崩溃。以曲线 3 为例, a 点电压正常, b 点电压达到运行最低限制, 而 c 点电压崩溃。如曲线 4 所示, 超前功率因数可能导致过电压问题。

无功功率和电压之间的关系通常用 VQ 曲线描述。VQ 曲线表示在一个给定母线上的无功功率支撑与这个母线上的电压之间的关系, 如图 2 所示。

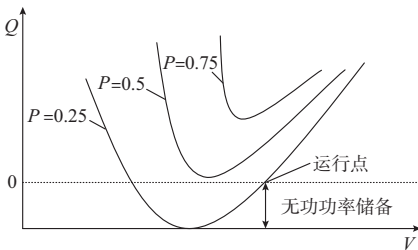


图 2 恒定功率因数下不同 P 的 VQ 曲线
Fig.2 VQ curves for different P with a constant power factor

图 2 显示了 3 个不同 P 值下的 VQ 曲线。对于给定的 $P = 0.25$, 有两个数值电压解, 只有右边的电压解是正常运行点, 实际电压随 Q 增加而增加。运行点到曲线最低点的垂直距离是无功功率储备。电压稳定性是系统维持电压稳定的能力, 当负荷导纳增大或者功率增加时, 功率和电压是可控制的^[20]。在

系统重负荷或有严重故障时, 电压崩溃的主要原因是缺乏足够的有功和无功率支撑。电压崩溃是一个动态过程, 且通常是大的扰动现象^[1]。当一个节点电压开始崩溃时, 将导致整个系统崩溃^[21]。当电力系统发生故障时, 从一个节点看进去的等效发电机阻抗 X 发生变化, 最终影响系统可以提供的最大有功和无功功率。因此, 系统崩溃点将随着故障状态的变化而变化。在系统故障时, 一个或者多个节点电压崩溃可能导致大面积停电事故。因此, 从系统可靠性角度出发, 在各种故障情况下, 通过故障后提供足够的有功和无功率储备以及在最恶劣情况下切除部分有功和无功负荷来防止电压崩溃是一项基本要求。

2 可靠性指标和评估技术

大部分可靠性评估技术提出的可靠性指标仅与有功功率有关, 例如 EENS 和 ELC。这些指标隐藏了一些重要的与电压稳定性密切相关的系统可靠性问题。为了给系统规划和运行人员提供不同方面的综合信息, 本文运用了文献[19]提出的与有功和无功率短缺有关的可靠性指标, 这些指标详细描述了与电力系统可靠性相关的不同方面。

对于节点 j, 由于有功功率短缺引起的 EENS 和由于无功功率短缺引起的 EENS 分别定义如下:

$$E_{ENS, P_j} = \sum_{i=1}^{N_C} 8760 L_{P_{ij}} p_i \quad (1)$$

$$E_{ENS, Q_j} = \sum_{i=1}^{N_C} 8760 L_{Q_{ij}} p_i \quad (2)$$

式中: N_C 为运行状态的总和; $L_{P_{ij}}$ 和 $L_{Q_{ij}}$ 分别为第 i 个状态下节点 j 由于有功功率和无功率短缺引起的有功负荷切除量。

对于节点 j, 由于有功功率短缺引起的无功不足期望值 E_{VNS, P_j} 和由于无功功率短缺引起的无功不足期望值 E_{VNS, Q_j} 分别定义如下:

$$E_{VNS, P_j} = \sum_{i=1}^{N_C} 8760 Q_{P_{ij}} p_i \quad (3)$$

$$E_{VNS, Q_j} = \sum_{i=1}^{N_C} 8760 Q_{Q_{ij}} p_i \quad (4)$$

式中: $Q_{P_{ij}}$ 和 $Q_{Q_{ij}}$ 分别为第 i 个状态下由于有功功率和无功率缺乏引起的无功负荷切除量。

对于节点 j, 由于电压越限引起的无功不足期望值 $E_{VarS, j}$ 定义如下:

$$E_{VarS, j} = \sum_{i=1}^{N_C} 8760 Q_{arQ_{ij}} p_i \quad (5)$$

式中: $Q_{arQ_{ij}}$ 为第 i 个状态下引起电压越限的无功功率不足量, 它也是在节点 j 为消除电压越限需注入

的无功功率。

系统可靠性指标可以通过节点可靠性指标来计算,例如系统由于有功功率短缺引起的 EENS 和由于无功功率引起的 EENS 可计算如下:

$$E_{ENS,PS} = \sum_{j=1}^{N_L} E_{ENS,Pj} \quad (6)$$

$$E_{ENS,QS} = \sum_{j=1}^{N_L} E_{ENS,Qj} \quad (7)$$

式中: N_L 为系统节点数。

其他系统可靠性指标可以用类似公式计算。

本文采用枚举法来确定可靠性指标,用潮流计算来确定每种故障状态的网络运行情况。用负荷减载技术和无功功率注入方法来减轻网络越限情况,并计算相关的 L_{Pij} , Q_{Pij} , L_{Qij} 和 Q_{arQij} 。

3 负荷减载技术

3.1 有功负荷减载

在系统故障时,常用切负荷策略来维持由于有功功率缺乏引起的功率平衡问题。通常采用比例切除方法,即按每个节点负荷占总负荷的比例来切除负荷。基于用户愿意承担的可靠性成本,可选择最优切负荷策略或基于可靠性成本的切负荷技术切除有功负荷^[22]。这些负荷减载技术和指标常用于安排发电计划。

3.2 网络中无功功率特性

与有功功率相比,无功功率在可靠性评估中有3点不同之处。①由于无功功率在传输过程中损耗明显,且节点电压对无功功率非常敏感,使得无功功率长距离传输效率不高。因此,无功功率通常按需就地补偿。②无功功率的主要作用是维持电力系统的电压稳定性和安全性。所以,在电能不足方面,无功功率对系统可靠性的影响是间接的,应该基于无功功率短缺和电压越限进行计算。③无功功率损耗随网络结构和运行条件的变化而变化^[5-6],事故后电压恢复所需的无功功率非常依赖电网无功功率储备的分布。为了合理确定有功和无功功率在故障后的重新调度和负荷减载量,应该考虑有功、无功功率与节点电压的特性以及它们之间的相互关系。

3.3 有功和无功负荷减载

为了区分由无功功率缺乏对可靠性造成的影响和由有功功率缺乏对可靠性造成的影响,本文采用一种三级负荷减载方法,其目的是为系统规划和运行人员提供有功和无功功率电源薄弱点和调度的详细信息。

在第一级负荷减载中,将系统总有功出力 and 总有功需求进行比较,总有功出力包括发电机和有功

备用,总有功需求包括总有功负荷和网络损耗。如果总有功出力小于总有功需求,则在系统内所有负荷节点用不同的负荷减载技术切除有功负荷^[22],同时按初始功率因数相应切除所有节点的无功负荷。本文中采用成比例切负荷方法。对于运行状态 i , 节点 j 的 L_{Pij} 和 Q_{Pij} 计算如下:

$$L_{Pij} = \frac{P_{lj} \left| \sum_{g=1}^{N_{G,i}} P_g - \sum_{j=1}^{N_L} P_{lj} - P_{i\text{loss}} \right|}{\sum_{j=1}^{N_L} P_{lj}} \quad (8)$$

$$Q_{Pij} = L_{Pij} \tan \varphi_j \quad (9)$$

式中: $N_{G,i}$ 为网络在状态 i 时的发电机组数目; P_g 为发电机 g 的最大有功功率容量; P_{lj} 为节点 j 在正常状态时的有功负荷; $P_{i\text{loss}}$ 为正常状态时系统的有功功率损耗; φ_j 是节点 j 的功率因数角。

在第二级负荷减载中,重点研究系统无功短缺问题,此时,平衡节点的无功出力受到限制。通过潮流分析,用第一级负荷减载后的负荷和发电机状态来确定系统无功功率缺额。首先,检测 PV 节点的无功补偿情况,如果一个 PV 节点的无功补偿大于或等于它的上限约束,则将它转化为 PQ 节点,同时将它的无功补偿量固定为它的上限约束值,之后再次进行潮流计算。如果平衡节点的无功出力越限,则采用成比例切负荷方法切除各节点无功负荷直至系统无功功率达到平衡。对于运行状态 i , 节点 j 的 Q_{Qij} 和 L_{Qij} 计算如下:

$$Q_{Qij} = \frac{Q_{lj} (Q_s - Q_{s,\text{max}})}{\sum_{j=1}^{N_L} Q_{lj}} \quad (10)$$

$$L_{Qij} = \frac{Q_{Qij}}{\tan \varphi_j} \quad (11)$$

式中: Q_s 和 $Q_{s,\text{max}}$ 分别为平衡节点的实际无功出力和无功出力上限限制; Q_{lj} 是正常状态下节点 j 的无功负荷。

在第三级负荷减载中,通过潮流分析检测节点电压越限问题。节点电压低于电压运行下限要求,说明局部无功功率短缺。由于远距离传输无功功率效率不高,因此,可在电压越限节点采取局部切负荷策略。在恒定功率因数下,有功和无功负荷以 1% 的步长迭代被切除直到消除电压越限。图 3 详细显示了在运行状态 i 下这一级的负荷减载过程。值得注意的是,如果这些节点的负荷被完全切除后,电压越限依然存在,根据无功功率的局部性特征,有必要切除其相邻节点的负荷(假设这些节点负荷可全部被切除),如图 3 所示。

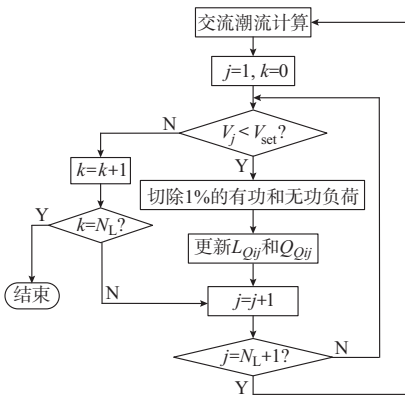


图3 状态*i*下第三级负荷减载过程示意图
Fig.3 Flow chart of the third stage load shedding process for state *i*

3.4 无功功率注入

本节讨论用无功功率就地注入技术解决由无功功率短缺引起的电压越限问题,即通过在电压越限节点注入无功功率来使电压恢复。当电压恢复到运行下限值时,相应的注入无功功率为无功功率短缺量 $Q_{ar,Qij}$ 。值得注意的是,无功功率注入对母线电压的影响与网络结构和无功功率电源的分布密切相关,同时还与用户的经济利益有关。本文中,在电压越限节点,以无功负荷的1%逐渐注入无功功率直至电压越限消除。无功功率注入方法研究的目的是为系统规划和运行人员提供确切信息,以确定新增无功功率电源的最佳位置和数量。

4 实例分析

以等效的太原 220 kV 电网为例进行分析来说明本文提出的可靠性分析方法,系统图如图 4 所示。

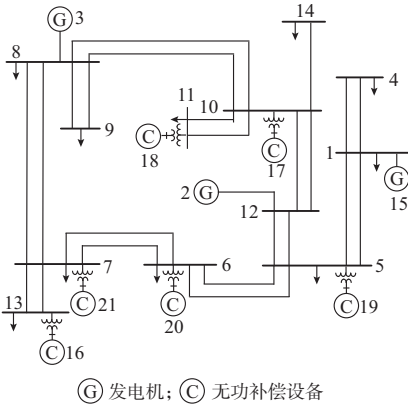


图4 等效太原 220 kV 系统图
Fig.4 Equivalent 220 kV Taiyuan power system

如图 4 所示,该系统有 9 个 PV 节点,11 个 PQ 节点。整个系统的有功和无功功率平均负荷分别为

1 383 MW 和 453 Mvar;有功和无功率峰值负荷分别为 2 355 MW 和 639 Mvar。节点 2、节点 3 和节点 15 分别与 3×200 MW, 4×300 MW, 600 MW 的发电机组相连。发电机和输电线路的可靠性参数分别见附录 A 表 A1 和表 A2。表 A1 还给出了发电机和无功功率补偿器的无功功率限制。根据系统实际运行情况,本文中的故障状态设为一阶和二阶故障。正常状态和一阶故障时电压阈值设定为 0.95(标么值),而二阶故障时电压阈值设定为 0.85(标么值)^[23]。应用不同的负荷减载技术,分别分析并比较说明有功和无功率对系统和负荷点可靠性的影响。

4.1 有功和无功负荷减载

在本节中,用前文提出的三级负荷减载技术来确定综合可靠性指标。在分析中,采用成比例切负荷策略,即按每一节点的初始功率因数成比例地切除该节点的有功和无功负荷。平均负荷和峰值负荷下,负荷节点和系统的 $E_{ENS,P}$ 和 $E_{ENS,Q}$ 如表 1 所示。

表 1 平均负荷和峰值负荷下负荷节点和系统的 $E_{ENS,P}$ 和 $E_{ENS,Q}$
Table 1 $E_{ENS,P}$ and $E_{ENS,Q}$ of load bus and system under average and peak load

节点	平均负荷		峰值负荷	
	$E_{ENS,P} / ((MW \cdot h) \cdot a^{-1})$	$E_{ENS,Q} / ((MW \cdot h) \cdot a^{-1})$	$E_{ENS,P} / ((MW \cdot h) \cdot a^{-1})$	$E_{ENS,Q} / ((MW \cdot h) \cdot a^{-1})$
1	0	0	151 100.60	223 731.40
4	0.000 444	3.388 502	36 264.16	29 007.67
5	0	0	58 348.09	1 218.69
6	0	0	20 921.63	436.98
7	0	0	37 658.93	786.57
8	0	0	49 979.44	1 043.90
9	0.000 081	0	20 921.60	436.98
10	0	0	62 997.35	1 315.80
11	0.004 421	0	60 440.26	1 266.50
13	0.000 214	0	26 733.19	558.37
14	6.996 100	0	22 142.35	461.26
系统	7.001 300	3.388 502	547 507.60	260 264.10

如表 1 显示,考虑二阶故障时,对于平均负荷,系统拥有充足的有功功率和无功功率,在一些节点的 $E_{ENS,P}$ 和 $E_{ENS,Q}$ 数值很小,主要是由于输电线路故障而造成的孤岛现象。而涉及峰值负荷时,分析结果表明系统有很大的有功和无功率缺额。节点 1 的 $E_{ENS,P}$ 最大是因为节点 1 的负荷最重,占到系统总负荷的 27.6%;同时,由于无功功率严重不足,节点 1 的 $E_{ENS,Q}$ 为系统总 $E_{ENS,Q}$ 的 85.96%。

表 2 显示了由有功和无功率短缺造成的负荷节点和系统的 $E_{VNS,P}$ 和 $E_{VNS,Q}$ 。虽然系统由于无功功率短缺引起的无功不足期望值小于由于有功功率短缺引起的无功不足期望值,但是节点 1 的 $E_{VNS,Q}$

比 $E_{VNS,P}$ 大得多。结果显示节点 1 的无功功率严重不足。

表 2 平均负荷和峰值负荷时负荷节点和系统的 $E_{VNS,P}$ 和 $E_{VNS,Q}$

Table 2 $E_{VNS,P}$ and $E_{VNS,Q}$ of load bus and system under average and peak load

节点	平均负荷		峰值负荷	
	$E_{VNS,P} / ((Mvar \cdot h) \cdot a^{-1})$	$E_{VNS,Q} / ((Mvar \cdot h) \cdot a^{-1})$	$E_{VNS,P} / ((Mvar \cdot h) \cdot a^{-1})$	$E_{VNS,Q} / ((Mvar \cdot h) \cdot a^{-1})$
1	0	0	69 738.81	103 260.65
4	0.000 060	0.456 145	4 881.70	3 904.88
5	0.000 016	0	12 320.52	257.33
6	0	0	4 649.31	97.11
7	0	0	6 276.52	131.09
8	0	0	11 158.20	233.06
9	0	0	4 184.31	87.40
10	0	0	11 623.14	242.77
11	0.000 982	0	11 158.21	233.81
13	0.000 060	0	8 136.22	169.94
14	1.499 200	0	4 428.53	92.25
系统	1.500 300	0.456 145	148 555.47	108 710.29

表 1 和表 2 的结果显示,系统有功和无功出力对系统平均负荷来说是充足的。但考虑系统故障时,如果系统运行在峰值负荷水平,将会有严重的有功和无功功率缺额。

4.2 有功负荷减载

用本文提出的三级负荷减载方法(方法 1)计算系统和负荷节点的 EENS,并与用常规成比例有功负荷减载方法(方法 2)得到的 EENS 进行比较,结果如表 3 所示。结果表明,本文提出的负荷减载策略更合理。

表 3 峰值负荷时负荷节点和系统的 EENS

Table 3 EENS of load bus and system under peak load

节点	EENS/((MW · h) · a ⁻¹)	
	方法 1	方法 2
1	374 832.00	2 533 502.60
4	65 271.83	464 232.40
5	59 566.78	876 604.03
6	21 358.61	278 045.82
7	38 445.50	649 654.85
8	51 023.34	862 196.25
9	21 358.58	195 172.29
10	64 313.15	1 086 768.30
11	61 706.76	572 321.93
13	27 291.56	249 386.81
14	22 603.61	206 073.73
系统	807 771.70	7 973 959.00

4.3 无功功率注入

采用按原始功率因数成比例切负荷策略以使电压恢复时,有功负荷可能会被不必要地切除。在系统某些位置注入无功功率同样可以解决由局部无功功率不足引起的电压越限问题。因此,本文研究了

就地无功功率注入的影响,来解决局部无功功率不足的问题。无功功率注入和负荷减载的目的,都是使每一个节点的电压恢复到最低限制水平。表 4 显示了平均和峰值负荷时,由于局部无功功率不足或电压越限引起的负荷节点和系统的 E_{VarS} 值。

表 4 负荷节点和系统的 E_{VarS}

Table 4 E_{VarS} of load bus and system

节点	$E_{VarS} / ((Mvar \cdot h) \cdot a^{-1})$	
	平均负荷	峰值负荷
1	0	165 170.68
4	0	8 031.40
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	1.53
13	0	0
14	0	0
系统	0	173 203.62

表 4 清晰地表明,在峰值负荷情况下,在经历了第一、二级无功负荷减载之后,节点 1 的无功功率缺乏状况依然很严重。此结论有助于系统规划人员选择无功功率补偿器的最佳位置。

5 结语

本文全面研究了有功和无功功率对电力系统可靠性评估的影响。将由于无功功率不足造成的可靠性问题和由于有功功率不足造成的可靠性问题分开研究,采用一种三级切负荷策略来评估电网负荷节点和系统的可靠性。用不同的负荷减载方法分别解决系统和局部无功功率短缺问题;同时,采用在电压越限节点注入无功功率的方法研究局部无功功率短缺问题。以等效的太原 220 kV 电网为例进行分析,验证了所提方法的有效性,结果显示无功功率对系统可靠性分析有重要影响。研究造成系统可靠性问题的详细原因可以大大减少负荷减载,本文的可靠性指标为系统决策和运行人员提供了重要的决策依据。

附录见本刊网络版 (<http://aeps.sgepri.sgcc.com.cn/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] TAYLOR C W. Power system voltage stability[M]. New York, USA: McGraw-Hill Inc, 1994.
- [2] LEONARDI B, AJJARAPU V. Investigation of various generator reactive power reserve (GRPR) definitions for online voltage stability/security assessment[C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting—Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, July 20-24, 2008.

- Pittsburgh, USA: 7p.
- [3] EL-SAMAHY I, BHATTACHARYA K, CAIZARES C, et al. A procurement market model for reactive power services considering system security[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2008, 23(1): 137-149.
- [4] DONG F, CHOWDHURY B H, CROW M L, et al. Improving voltage stability by reactive power reserve management [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(1): 338-345.
- [5] HAO S, PAPALEXOPOULOS A. Reactive power pricing and management[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 95-104.
- [6] RAJABI A, MONSEF H. Valuation of dynamic reactive power based on probability aspects of power system [C]// 42nd International Universities Power Engineering Conference, September 4-6, 2007, Brighton, UK: 1169-1174.
- [7] TAMIMI A, PAHWA A, STARRETT S. Effective wind farm sizing method for weak power systems using critical modes of voltage instability[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2012, 27(3): 1610-1617.
- [8] YAN R, SAHA T K. Investigation of voltage stability for residential customers due to high photovoltaic penetrations[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2012, 27(2): 651-662.
- [9] ALLAN R N, BILLINTON R, BREIPOHL A M, et al. Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation: 1987-1991 [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(1): 41-49.
- [10] ALLAN R N, BILLINTON R, BREIPOHL A M, et al. Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(1): 51-57.
- [11] BILLINTON R, FOTUHI-FIRUZABAD M, BERTLING L. Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation 1996-1999 [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(4): 595-602.
- [12] DING Y, WANG P. Reliability and price risk assessment of a restructured power system with hybrid market structure[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(1): 108-116.
- [13] FENG Z, AJJARAPU V, MARATUKULAM D J. A practical minimum load shedding strategy to mitigate voltage collapse [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(4): 1285-1291.
- [14] TAYLOR C W. Concepts of undervoltage load shedding for voltage stability[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(2): 480-488.
- [15] ABED A M. WSCC voltage stability criteria, undervoltage load shedding strategy, and reactive power reserve monitoring methodology[C]// IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, July 18-22, 1999, Edmonton, Canada: 191-197.
- [16] ZHONG J, NOBILE E, BOSE A, et al. Localized reactive power markets using the concept of voltage control areas[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(3): 1555-1561.
- [17] MOORS C, LEFEBVRE D, CUTSEM T V. Design of load shedding schemes against voltage instability[C]// IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, January 27-31, 2000, New York, USA: 1495-1500.
- [18] SAADAT H. Power system analysis[M]. New York, USA: McGraw-Hill Inc, 1999.
- [19] QIN W, WANG P, HAN X, et al. Reactive power aspects in reliability assessment of power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(1): 85-92.
- [20] System Dynamic Performance Subcommittee of the IEEE Power System Engineering Committee. Voltage stability of power systems: concepts, analytical tools and industry experience[M]. New York, USA: IEEE, 1990.
- [21] CHEN Y. Weak bus-oriented optimal multi-objective VAR planning[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4): 1885-1889.
- [22] WANG P, BILLINTON R. Optimal load shedding technique to reduce the total customer interruption cost in distribution system[J]. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2000, 147(1): 51-56.
- [23] VAN CUTSEM T, MOISSE C, MAILHOT R. Determination of secure operating limits with respect to voltage collapse[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(1): 327-335.

秦文萍(1972—),女,副教授,主要研究方向:电力系统可靠性分析、新能源技术和微机保护。E-mail: qinwenping1027@163.com

王 鹏(1955—),男,博士,副教授,主要研究方向:电力系统可靠性分析、新能源规划和新能源转换系统、混合交直流微电网、混合能源系统、智能配电系统、新型储能系统等。E-mail: epwang@ntu.edu.sg

韩肖清(1964—),女,博士,教授,主要研究方向:电力系统运行与控制、新能源技术。E-mail: hanxiaqing@tyut.edu.cn

刘志娟(1989—),女,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:电力系统微机保护和稳定运行。E-mail: 827259239@qq.com

(编辑 蔡静雯)

Adequacy Evaluation of Active and Reactive Power in Power Systems

QIN Wenping¹, WANG Peng^{1,2}, HAN Xiaoqing¹, LIU Zhijuan¹

(1. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798)

Abstract: Reactive power plays an important role in power system reliability as it is closely related to system voltage stability and voltage collapse. However, the reactive power related reliability issues are seldom emphasized in conventional power reliability evaluation. This paper studies the power system reliability from the perspective of active and reactive power, respectively. Active and reactive power inadequacy and the associated voltage perturbation due to system failure are considered in reliability evaluation of power systems. A three-stage load shedding technique for past contingencies are implemented to determine the influence of active and reactive power on system reliability and to find an optimal way to relieve network violation.

This work is supported by International Science & Technology Cooperation Program of China (No. 2010DFB63200), Shanxi Province Scientific Technological Key Projects Tackling (No. 20120321005-02, No. 20130321027-01), and Shanxi Province Science and Technology Activities Project for Selected Scholars Back from Overseas.

Key words: reactive power; adequacy; reliability evaluation; voltage stability