

重负荷状态下电力网络方程无解的最优调整策略

衣 涛,王承民,谢 宁,张 焰

(上海交通大学 电气工程系,上海 200240)

摘要: 研究电力系统潮流无解情况下的节点负荷最优调整策略对于电力系统稳定性分析非常重要。建立以节点电压和支路电流为变量的混合电力网络方程,得到以支路电流表示的节点电压的表达式和潮流无解的边界条件。以节点负荷调整量最小为优化目标得到 Kuhn-Tucker 条件,形成扩展的用于迭代计算的方程组,求解该方程即可得到给定条件下负荷最近的调整方向和最小的调整量值。仿真计算表明,所提方法是正确和有效的。

关键词: 混合电力方程; 支路电流; 潮流无解; 潮流调整; Kuhn-Tucker 条件; 电力系统; 稳定性; 优化; 负荷

中图分类号: TM 744

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.10.015

0 引言

潮流计算是电力系统中的基本计算,在研究系统规划、稳定和运行状态等方面有着非常重要的作用。由于我国目前电力系统大面积联网形成了大送端和大受端的电网格局,并且电力负荷逐年加重使得系统设备接近极限运行,尤其是风电等可再生能源大规模并网带来的不确定性,使得潮流计算较之以往更容易出现收敛困难而无解的情况。因此,对无解潮流研究进而将其调整到有解区域就显得十分必要。

潮流不收敛的一个典型原因就是电力网络在重负荷情况下产生了病态潮流的问题。目前对此类病态潮流求解的一个主要研究方向是改变负荷点的负荷水平,使系统向着有解区域进行调整。在不同调整方向上可能都会达到有解区域,因此这涉及到一个最优调整策略的问题,但是由于在调整有功和无功功率时需要考虑发电机出力水平、无功补偿装置的补偿能力、重要负荷等因素,使得最优调整策略的制定变得复杂。

因为潮流计算不收敛,因此采用常规的潮流计算方法如牛顿法无法进行求解,需要对原有方法进行改进或转化为其他形式的问题来分析。目前,潮流无解调整的方法主要集中在以下几个方面。最优乘子法^[1-3]在常规牛顿法的基础上增加了最优乘子的部分,能够保证潮流的收敛性,通过最优乘子确定系统解的临界点,进而确定潮流无解的调整方向,但最优乘子法对计算初值较为敏感的问题还没有很好地解决。改进的牛顿法^[4-7]在原有牛顿法的基础上通过预测、校正等环节追踪潮流方程的平衡解流形,改善潮流算法的病态现象和收敛性,是对潮流无解情况

下近似计算的一种比较可靠的方法。非线性规划法^[8-11]则将潮流解的临界条件转化为约束优化问题,利用 Kuhn-Tucker 最优性条件,采用内点法或梯度法进行求解。此外,文献[12]和[13]分别采用降出力法和电路分析法将电力系统潮流调整到有解可行域;文献[14]采用同伦算法对无解潮流进行了计算,也取得了较好的效果。

在潮流无解向有解区域调整的过程中,确定无解的边界条件是至关重要的一步^[15]。但是由于传统的电力网络方程是以节点电压方程为基础的,采用的变量主要是节点电压和节点注入功率,因为节点电压之间的相互关联性,很难直观得到无解边界条件,大多是通过逐渐逼近的方式达到无解边界。本文将支路电流与节点电压一同作为状态变量来表示电力网络方程,推导出潮流无解的边界条件,并结合负荷调整量最小为优化目标的 Kuhn-Tucker 条件,求解此条件可解得负荷最近的调整方向的大小。

1 以节点电压-支路电流为变量的电力网络方程

在直角坐标系下,当忽略对地支路电导时,电力网络可以描述为支路电流-节点电压方程混合的形式^[16-17],如式(1)~(3)所示。

$$\begin{aligned} \dot{U}_i R_{ij} - \dot{U}_i X_{ij} - U_i \cos \theta_i + U_j \cos \theta_j &= 0 \\ \dot{U}_i X_{ij} + \dot{U}_i R_{ij} - U_i \sin \theta_i + U_j \sin \theta_j &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

对于节点 i 有:

$$U_i \cos \theta_i \sum_{l \in i} \dot{I}_{li}^2 + U_i \sin \theta_i \sum_{l \in i} \dot{I}_{li}^2 = p_i \quad (2)$$

$$U_i \cos \theta_i \sum_{l \in i} \dot{I}_{li}^2 - U_i \sin \theta_i \sum_{l \in i} \dot{I}_{li}^2 + U_i^2 \sum_{l \in i} B_l = -q_i \quad (3)$$

其中, $l=1, 2, \dots, L$ (L 为支路数); $i, j=1, 2, \dots, N$ (N 为节点数); $l \in i$ 表示支路 l 与节点 i 相关联; $\dot{I}_{li}^2$ 分别为支路 l 电流的实部和虚部; U_i, θ_i 分别为节点 i 电压的幅值和相角; R_{ij}, X_{ij} 分别为支路 l 的电阻和电抗; B_l 为支路 l 对地的 $1/2$ 电纳; p_i, q_i 分别为节点注入的

收稿日期: 2013-11-15; 修回日期: 2014-09-02

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51307108)

Project supported by the Youth Science Fund Project of National Natural Science Foundation of China(51307108)

有功和无功功率。对于节点 j 有与式(2)、(3)相同形式的方程。令 $x_i = \sum_{l \in i} i_{li}^a, y_i = \sum_{l \in i} i_{li}^b$ 分别表示节点注入电流的实部和虚部(不含对地支路电流); $B_{i0} = \sum_{l \in i} B_{li}$ 。由式(2)和(3)可得节点电压的实部和虚部:

$$\begin{cases} U_i \cos \theta_i = \{ [2B_{i0}p_i x_i - y_i(x_i^2 + y_i^2)] \mp \\ y_i \sqrt{(x_i^2 + y_i^2)^2 - 4B_{i0}q_i(x_i^2 + y_i^2) - 4B_{i0}^2 p_i^2} \} \div \\ [2B_{i0}(x_i^2 + y_i^2)] \\ U_i \sin \theta_i = \{ [2B_{i0}p_i y_i + x_i(x_i^2 + y_i^2)] \pm \\ x_i \sqrt{(x_i^2 + y_i^2)^2 - 4B_{i0}q_i(x_i^2 + y_i^2) - 4B_{i0}^2 p_i^2} \} \div \\ [2B_{i0}(x_i^2 + y_i^2)] \end{cases} \quad (4)$$

显然,节点电压的表达式由支路电流和节点注入功率表达而成,并且解的个数与是否存在实数解由方程的根号内表达式决定。

此外,发电机节点通常定义为 PV 节点,式(3)的节点无功方程被下式所取代:

$$e_i^2 + f_i^2 = U_i^2 \quad (5)$$

得到节点电压的解析表达式为:

$$\begin{cases} U_i \cos \theta_i = \frac{p_i x_i \mp y_i \sqrt{(x_i^2 + y_i^2)U_i^2 - p_i^2}}{x_i^2 + y_i^2} \\ U_i \sin \theta_i = \frac{p_i y_i \pm x_i \sqrt{(x_i^2 + y_i^2)U_i^2 - p_i^2}}{x_i^2 + y_i^2} \end{cases} \quad (6)$$

与 PQ 节点类似, PV 节点也存在双解的问题,所以系统中除平衡节点外的其他节点可以采用相同的方法对潮流无解调整策略进行研究。

2 潮流无解边界条件

对式(4)进行分析可知,如果方程有解存在,其表达式必须满足式(7)、(8)条件之一:

$$x_i^2 + y_i^2 > 2B_{i0}(q_i + \sqrt{p_i^2 + q_i^2}) \quad (7)$$

$$x_i^2 + y_i^2 = 2B_{i0}(q_i + \sqrt{p_i^2 + q_i^2}) \quad (8)$$

式(7)的物理意义是:当节点注入电流的幅值在以 0 为圆心、 $\sqrt{2B_{i0}(q_i + \sqrt{p_i^2 + q_i^2})}$ 为半径的圆外时(如图 1 中的 c 点),方程有高低压解存在,系统是潮流可解的;式(8)说明当只有“=”成立时,方程有唯一解,解在圆上(如图 1 中的 a 点),达到了系统的有解边界。而当

$$x_i^2 + y_i^2 < 2B_{i0}(q_i + \sqrt{p_i^2 + q_i^2}) \quad (9)$$

条件满足时,方程无实数解,节点位于圆的内部(如图 1 中的 b 点),系统是潮流不可解的。在此情况下,可以通过调整发电机出力、投入无功补偿装置、改变负荷水平等将系统调整到有解区域,最基本的要求是调整到有解边界的 a 点上。当然在不同的调整方向上这样的 a 点有多个(如图 1 中的 a' 、 a'' 点),找到最近的 a 点代表着最小的调整量,是方程无解情况下的优化调整目标。同样,对于 PV 节点存在唯一解

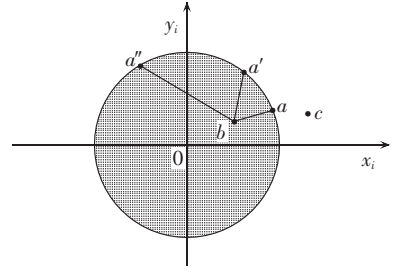


图 1 潮流解边界条件

Fig.1 Boundary conditions of power flow solution

的边界条件为:

$$(x_i^2 + y_i^2)U_i^2 - p_i^2 = 0 \quad (10)$$

其物理意义是当节点注入电流幅值分布在以 0 为圆心、 p_i/U_i 为半径的圆上时,电力网络方程有唯一解存在。

而当满足条件式(8)或式(10)时,即在图 1 中的 a 点上,节点电压变为式(11)或式(12)。

$$\begin{cases} U_i \cos \theta_i = \frac{2B_{i0}p_i x_i - y_i(x_i^2 + y_i^2)}{2B_{i0}(x_i^2 + y_i^2)} \\ U_i \sin \theta_i = \frac{2B_{i0}p_i y_i + x_i(x_i^2 + y_i^2)}{2B_{i0}(x_i^2 + y_i^2)} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} U_i \cos \theta_i = \frac{p_i x_i}{x_i^2 + y_i^2} \\ U_i \sin \theta_i = \frac{p_i y_i}{x_i^2 + y_i^2} \end{cases} \quad (12)$$

3 潮流无解最优调整模型

对于潮流无解的优化调整策略,可以采用节点负荷调整量最小作为目标函数,表示为:

$$f(p_a, q_a) = \min \sqrt{(p_a - p_b)^2 + (q_a - q_b)^2} \quad (13)$$

其中, p_b, q_b 为节点给定的负荷初始值; p_a, q_a 为满足式(8)或式(10)的达到潮流有解的节点负荷功率边界值,即将潮流无解的节点功率调整到有解的临界点上。这里采用最小的欧氏距离作为优化目标,得到调整量最小的负荷调整方向。不等式约束条件为:

$$q_a^{\min} \leq q_a \leq q_a^{\max} \quad (14)$$

$$p_a^{\min} \leq p_a \leq p_a^{\max} \quad (15)$$

$$U_a^{\min} \leq U_a \leq U_a^{\max} \quad (16)$$

式(14)代表了发电机或无功补偿装置对无功功率的调节能力约束;式(15)对于 PV 节点代表了发电机对有功功率的调节能力约束,对于 PQ 节点则代表节点上有重要负荷而必须保留的功率值;式(16)代表节点电压约束。等式约束条件为式(8)或式(10)。式(16)中电压幅值 U_a 由式(11)或式(12)推导得到,结果如式(17)或(18)所示:

$$U_a = \frac{\sqrt{4B_{i0}^2 p_a^2 + (x_a^2 + y_a^2)^2}}{2B_{i0} \sqrt{x_a^2 + y_a^2}} \quad (17)$$

$$U_a = \frac{p_a}{\sqrt{x_a^2 + y_a^2}} \quad (18)$$

对于以式(13)为目标函数和式(14)—(16)及式(8)或式(10)为约束条件的优化模型可以形成扩展的拉格朗日方程 $L(s,t)$,其中 s 代表 a 点有功、无功, t 代表与 a 点相关联的电流实部、虚部。 $L(s,t)$ 的 Kuhn-Tucker 条件为:

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial s} + \frac{\partial g}{\partial s}\beta^T + \frac{\partial h}{\partial s}\alpha^T = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial g}{\partial t}\beta^T + \frac{\partial h}{\partial t}\alpha^T = 0 \\ g(s,t) = 0 \\ h(s,t) \leq 0 \\ h(s,t)\alpha^T = 0 \\ \alpha \geq 0 \end{cases} \quad (19)$$

其中, α 、 β 为拉格朗日因子; $h(s,t) \leq 0$ 为不等式约束条件式(14)—(16); $g(s,t) = 0$ 为在 a 点的等式约束条件式(8)或式(10)。

求解上述优化模型得到 a 点的 p_a 和 q_a 后,节点 b 的负荷裕度最小的变化方向由下式确定:

$$\delta_b = \arctan \frac{q_a - q_b}{p_a - p_b} \quad (20)$$

其中, δ_b 为节点 b 向负荷调整量最小的有解方向调整的角度。

最小负荷裕度值由欧氏距离来确定:

$$\eta_b = \sqrt{(p_a - p_b)^2 + (q_a - q_b)^2} \quad (21)$$

4 模型求解步骤

模型求解步骤如下:

- a. 给定各支路电流的初值 $i_l^{(0)}$ 和 a 点的初始功率 $S_a^{(0)} = p_a^{(0)} + j q_a^{(0)}$;
- b. 对于待求的临界点 a ,按照式(19)形成 Kuhn-Tucker 条件,应用牛顿法进行迭代求解;
- c. 如果 $\|S_a^{(k+1)} - S_a^{(k)}\| \leq \varepsilon$ (ε 为一个很小的正数),则结束迭代,否则设 $k = k + 1, i_l^{(k+1)} = i_l^{(k)} + \Delta i_l, S_a^{(k+1)} = S_a^{(k)} + \Delta S_a$,并返回步骤**b**;
- d. 根据计算出的临界点 a 的功率值,由式(20)和式(21)计算系统方程无解调整的方向和大小。

5 算例分析

在计算过程中,所有量值都采用标么值计算,功率基准值为 $100\text{ MV}\cdot\text{A}$,电压基准值为额定电压,电压上下限取 $[0.9, 1.1]$ 。

算例 1:以 IEEE 14 节点为例进行计算,将节点 1 与节点 14 编号对调,节点 14 为平衡节点,将表 1 中所列节点的负荷功率同时增加为原来的 4.5 倍,潮流计算不收敛。采用本文提出方法对各节点分别进行计算,得到各节点调整到潮流收敛时应切除的最小负荷量值,计算结果如表 1 所示。

节点 10、11 和 12 处在重负荷区域且电源支持

表 1 IEEE 14 节点系统潮流无解优化调整计算结果
Table 1 Results of optimal adjustment calculation for IEEE 14-bus system with unsolvable power flow

节点	初始 负荷	负荷 临界值	切除 负荷	负荷切除 比例/%	调整 方向/(°)
1	0.707	0.405	0.302	42.72	57.01
4	2.158	1.362	0.796	36.89	-10.93
6	0.607	0.241	0.366	60.29	10.83
7	0.005	—	—	—	—
9	1.523	0.892	0.631	41.43	-12.95
10	0.482	0.139	0.343	71.16	28.01
11	0.177	0.022	0.155	87.57	31.81
12	0.284	0.079	0.205	72.18	7.02
13	0.661	0.254	0.407	61.57	42.77

不足,负荷切除百分比较大,虽然节点 4 初始负荷较大,但由于附近电源点多,因此并不是负荷切除比例最大的。节点 7 因为本身负荷较小,因此在切除其所有负荷后系统仍然无法收敛。负荷切除比例代表切除负荷占初始负荷的百分数,表中节点 10、11 和 12 的负荷切除比例较大,但它们的初始负荷并不是最大的,这也说明负荷切除比例大小和网络结构、负荷分布、电源分布等多种因素有关。

算例 2:采用安徽某地区电网进行验证,取典型日数据进行计算,137 个节点,总有功负荷 622.68 MW,无功负荷 50.99 Mvar,假定与地区外电网交换功率在计算过程中保持不变。将其中 6 个 110 kV 变电站负荷同时增加到原来的 7 倍,潮流计算发散。采用本文的计算方法对表 2 中所列变电站分别针对下列 3 种情况进行计算,得到各变电站要切除的最小负荷值:情况 1 为正常情况下计算需要切除的负荷;情况 2 为投入这 6 个变电站的无功补偿装置,最多可以补偿无功功率 38.8 Mvar;情况 3 为不投入无功补偿装置,并且放王变有 120 MW 为重要负荷不能切除。

表 2 几种情况下的切除负荷比较
Table 2 Comparison of load shedding among different conditions

变电站	切除负荷		
	情况 1	情况 2	情况 3
放王变	0.711	0.580	0.382
乌江变	0.098	0.068	0.139
沈巷变	0.429	0.361	0.654
银屏变	0.501	0.362	0.691
金巢变	0.155	0.101	0.233
槐光变	0.388	0.321	0.476
总切除负荷	2.282	1.793	2.575

对于潮流无解向有解区域调整都是以尽量减少切除负荷为目标,可以采用的调控方法也有多种。对于情况 2,表 1 说明当对测试系统进行无功补偿后,系统总的负荷切除量减少了 48.9 MW,这是因为无功补偿装置对节点电压的支持,使得各变电站的潮流有解的功率临界值范围变大了。当放王变有重要负荷不能切除时,总的负荷切除量值增加了 29.3 MW,

这是因为此时的优化过程是有条件的优化,并不是最优结果,要保证重要负荷不被切除,需要在其他变电站切除更多的负荷来弥补。

采用改进牛顿法和最优乘子法对算例 2 进行计算,各变电站切除负荷量值的计算结果比较见表 3。由此可以看出,本文提出的算法优于改进牛顿法和最优乘子法。

表 3 与其他算法的比较
Table 3 Comparison among different algorithms

变电站	切除负荷		
	本文算法	改进牛顿法	最优乘子法
放王变	0.711	0.721	0.718
乌江变	0.098	0.105	0.099
沈巷变	0.429	0.444	0.451
银屏变	0.501	0.508	0.513
金巢变	0.155	0.165	0.163
槐光变	0.388	0.398	0.388
总切除负荷	2.282	2.341	2.332

6 结论

在进行电力系统无解调整过程中,采用节点电压和支路电流作为状态变量的网络方程的维数增加了,同时由于需要考虑运行时的节点注入功率的限制而使计算复杂度增加,与传统的节点电压作为状态变量的方程相比较,这给问题的求解带来了一定困难。在本文中,利用解的唯一性边界条件和优化目标的 Kuhn-Tucker 条件采用牛顿法求解。最终本文得出以下结论:

- a. 电力网络方程可以表示为基于节点电压和支路电流的混合形式;
- b. 从切负荷的计算结果来看,提出的调整策略优于其他方法;
- c. 本文提出的基于节点电压和支路电流混合方程的数学模型可以应用于电力系统其他优化问题中。

参考文献:

[1] 胡泽春,严正. 带最优乘子牛顿法在交直流系统潮流计算中的应用[J]. 电力系统自动化,2009,33(9):26-31.
HU Zechun,YAN Zheng. Application of Newton load flow methods with optimal multiplier for AC/DC power systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(9):26-31.

[2] 张勇军,蔡广林,邱文峰. 基于最优乘子潮流估计的故障筛选与排序[J]. 电工技术学报,2010,25(1):123-128.
ZHANG Yongjun,CAI Guanglin,QIU Wenfeng. Contingency screening and ranking based on optimal multiplier power flow evaluation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010,25(1):123-128.

[3] TATE J E,OVERBYE T J. A comparison of the optimal multiplier in polar and rectangulat coordinates [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2005,20(4):1667-1674.

[4] 赵晋泉,张伯明. 改进连续潮流计算鲁棒性的策略研究[J]. 中国

电机工程学报,2005,25(22):7-11.

ZHAO Jinquan,ZHANG Boming. A study on the strategy for improving robustness of continuation power flow computation[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(22):7-11.

[5] 吴昊,卫志农,王成亮,等. 基于连续潮流综合算法的电压稳定性研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(6):99-104.
WU Hao,WEI Zhinong,WANG Chengliang,et al. Voltage stability study based on synthesis method of continuous power flow[J]. Power System Protection and Control,2011,39(6):99-104.

[6] BARBOZA L V,LERM A A P,SALGADO R. Unsolvble power flow-restoring solutions of the electric power network equations [C]//IEEE International Symposium on Circuits and Systems. New York,USA:IEEE,2005:5294-5297.

[7] AJJARAPU V,CHRISTY C. The continuation power flow:a tool for steady state voltage stability analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1992,7(1):416-423.

[8] 韦化,丁晓莺. 基于现代内点理论的电压稳定临界点算法[J]. 中国电机工程学报,2002,22(3):27-31.
WEI Hua,DING Xiaoying. An algorithm for determining voltage stability critical point based on interior point theory[J]. Proceedings of the CSEE,2002,22(3):27-31.

[9] 郭力,张尧,胡金磊,等. 恢复潮流可行解的优化控制策略[J]. 电力系统自动化,2007,31(16):24-28.
GUO Li,ZHANG Yao,HU Jinlei,et al. An optimal control strategy for recovering feasible solution of the power flow [J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(16):24-28.

[10] BARBOZA L V,FRANCISCO J B,ZAMBALDI M C. Restoring solution of electric network equations;an approach based on the augmented Lagrangean algorithm[J]. IEEE Latin America Trans,2010,8(6):670-677.

[11] LIU Lin,WANG Xifan,DING Xiaoying,et al. An extended optimal power flow measure for unsolvable cases based on interior point method [C]//IEEE Power & Energy Society General Meeting. Calgary,Canada:IEEE,2009:1-9.

[12] 李敏,陈金福,陈海炎,等. 一类潮流计算无解的实用性调整研究[J]. 电力系统自动化,2006,30(8):11-15.
LI Min,CHEN Jinfu,CHEN Haiyan,et al. Load flow regulation for unsolvable cases in a power system [J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(8):11-15.

[13] 徐涛,康海珍,张振程,等. 用电路分析法研究电力系统潮流可行域[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(15):5-10.
XU Tao,KANG Haizhen,ZHANG Zhencheng,et al. Study of power flow feasible region by electric circuit analysis method [J]. Power System Protection and Control,2009,37(15):5-10.

[14] SONG H,BAIK S D,LEE B. Determination of load shedding for power-flow solvability using Outage-Continuation Power Flow (OCPF) [J]. IEE Proceedings-Generation,Transmission and Distribution,2006,153(3):321-325.

[15] OVERBYE T J. A power flow measure for unsolvable cases[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1994,9(3):1359-1365.

[16] 郑健,王承民,张焰. 电力网络节点-回路混合分析方法的基本原理[J]. 电网技术,2007,31(1):10-14.

作者简介:



许 烽

许 烽(1988—),男,浙江绍兴人,博士研究生,研究方向为大规模交直流电力系统电磁暂态分析、直流输电系统(E-mail: xuf_1988@zju.edu.cn);

徐 政(1962—),男,浙江海宁人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为大规模

模交直流电力系统分析、直流输电与柔性交流输电、电力谐波与电能质量、风力发电技术与风电场并网技术(E-mail: xuzheng007@zju.edu.cn);

刘高任(1990—),男,天津人,博士研究生,研究方向为直流输电与柔性交流输电(E-mail: liugaoren@zju.edu.cn);

黄弘扬(1987—),男,浙江温州人,博士,研究方向为大规模交直流电力系统分析(E-mail: 05dqgchhy@zju.edu.cn)。

Hybrid tripole HVDC system based on F-MMC and LCC, and its control strategy

XU Feng, XU Zheng, LIU Gaoren, HUANG Hongyang

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The existing tripole HVDC system adopts the thyristor converter as its pole 3, which causes AC voltage fluctuation and transition overvoltage/overcurrent. An improved hybrid tripole HVDC system is proposed, which adopts the modular multilevel converter based on the cascaded FBSM (Full Bridge Sub-Modules) as its pole 3. For better response performance, it is required to control the reactive power (voltage) balance, DC current balance and sub-module capacitor voltage balance. The modified current control and AC voltage control are proposed for the modular multilevel converter and the capacitor voltage balance control is proposed for the FBSM. The proposed system is simulated with PSCAD/EMTDC and results show that, the proposed system with given control strategy realizes the voltage balance, DC current balance and capacitor voltage balance perfectly.

Key words: DC power transmission; hybrid tripole HVDC; LCC (Line Commutated Converter); F-MMC; reactive power (voltage) balance; current balance; capacitor voltage balance; control

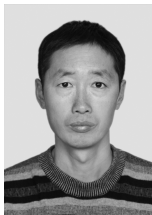
(上接第 95 页 continued from page 95)

ZHENG Jian, WANG Chengmin, ZHANG Yan. Basic theory of hybrid analysis method of node and loop in power network[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 10-14.

[17] 王承民, 蒋传文. 基于支路电流状态变量的灵敏度分析方法研究[J]. 电工技术学报, 2006, 21(1): 42-46.

WANG Chengmin, JIANG Chuanwen. Research on sensitivity analysis method based on line current variable[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(1): 42-46.

作者简介:



衣 涛

衣 涛(1973—),男,黑龙江齐齐哈尔人,讲师,博士研究生,研究方向为电力系统稳定(E-mail: yitao4965@126.com);

王承民(1970—),男,辽宁大连人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统经济运行。

Optimal adjustment strategy for unsolvable power network equation in heavy load condition

YI Tao, WANG Chengmin, XIE Ning, ZHANG Yan

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The optimal node load adjustment strategy of power system with unsolvable power flow is very important for the system stability analysis. With the node voltage and the branch current as its variables, the hybrid electric network equations are established, based on which, the expression of node voltage by branch current and the boundary conditions of unsolvable power flow are obtained. With the minimum node load adjustment as its optimization objective, the Kuhn-Tucker condition is obtained and the extended equations for iterative calculation are formed. The nearest adjustment direction and the minimum adjustment amount of the load under given condition are the solutions of the extended equations. Simulative calculation shows the proposed method is correct and effective.

Key words: hybrid electric network equation; branch current; unsolvable power flow; power flow regulation; Kuhn-Tucker condition; electric power systems; stability; optimization; electric loads