

基于柔性开关的配电网主动潮流调控研究

为促进分布式发电的规模化接入，配电网正朝着主动控制和主动管理的方向发展。提出了一种基于电力电子技术的新型联络开关——柔性开关，它能够应用于配电网潮流的主动调控。首先，给出了 dq 坐标系下柔性开关的简化数学模型，分析了所采用的双闭环控制策略；然后，应用PSCAD对柔性开关的动态响应特性进行了仿真分析；在此基础上，以柔性开关作为潮流控制单元，结合混合粒子群算法，研究了其在配电网潮流优化中的应用。以IEEE 33节点测试系统为算例并考虑不同负荷程度，对基于柔性开关的配电网潮流主动调控进行了仿真分析。结果表明柔性开关的接入应用能够有效降低网络线路损耗、改善电压分布水平。

李智诚/北京交通大学电气工程学院

邓立 喻乐 耿琳 张雷/国家电网公司华北分部



李智诚/博士研究生

关键词/Keywords

柔性开关 ·
主动配电网 ·
潮流控制 ·
粒子群算法 ·

随着分布式发电并网渗透率的提高，配电网原有结构对于功率传输配送的制约问题日益突出。但网架重新规划、配电线路重新建设在城市配电网中面临着输电走廊稀缺和建设成本高昂等问题^[1]，因而需要充分利用现有网架拓扑的配送电能力。另一方面，分布式发电出力的间歇性和波动性会导致配电网潮流快速变化，在高度渗透情况下可能使配电设备运行时出现功率越限。然而，传统配电网主要依靠分段器与联络开关实现网络重构并控制有功潮流^[2]，由于调整方式与开关动作次数的限制，难以应对分布式发电的不确定性，因此需要采取新的技术手段，实现配电网主动、柔性的潮流控制。

主动配电网是未来配电网发展的重

要趋势，目前世界范围内共有11个国家和地区开展了24个具有创新性的主动配电网项目^[3]。其中，为实现配电网网架的灵活调整和网络潮流的柔性控制，相关机构和专家学者从理论分析、仿真建模、控制与保护、关键设备设计与制造以及工程应用等多方面展开了研究。目前，国外研究机构已针对配电网的不同控制目标提出了多种设备形态：加拿大提出解耦互联器，稳态下可实现网络间潮流互济，故障下可限制短路电流；日本提出回路功率控制器，可实现环网运行、优化馈线间潮流分布；英国提出柔性常开节点，可有效结合辐射形配电网与环网形配电网的主要优势；荷兰提出能量路由器，可加强配电网组网运行方式的灵活性。而我国在此领域还处于起步阶段，相关研究较少，亟需开展技术研究。

柔性开关(Flexible Tie Switch, FTS)是一种基于电力电子技术的新型联络开关。相比传统的隔离开关与断路器，它能够准确调控其所连两端馈线的有功功率与无功功率，且具有响应速度快、能频繁动作和控制连续等特点。本文以柔性开关为研究对象，分析其在 dq 同步旋转坐标系下的数学模型及相应的双闭环控制策略，进而在PSCAD中建模仿真验证柔性开关所具备的动态功率调控特性。在此基础上，将柔性开关作为潮流调控单元，结合混合粒子群算法研究其在配电网潮流主动调控中的应用，并以IEEE 33节点测试系统为例进行仿真验证。

北京交通大学基本科研业务费项目
(2013YJS082)。

柔性开关

1. 数学模型

柔性开关以全控型电力电子器件为基础,可由不同的设备形态具体实现,如日本的回路功率控制器、英国的柔性常开节点。背靠背电压源型变流器(Voltage Source Converter, VSC)是其中一种主要的实现方式,结构如图1所示。其中, C 为直流支撑电容; L_1 和 L_2 为交流滤波电抗; R_1 和 R_2 为柔性开关的损耗等效电阻。本文以背靠背VSC为例研究柔性开关的动态响应特性。

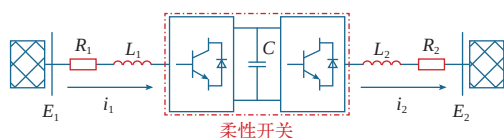


图1 柔性开关的结构示意图

在 dq 同步旋转坐标系下给出柔性开关的简化数学模型^[4, 5]

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R_1}{L_1} & \omega \\ \omega & -\frac{R_1}{L_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{U_{dc}m_{d1} - E_{d1}}{L_1} \\ \frac{U_{dc}m_{q1} - E_{q1}}{L_1} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{d2} \\ i_{q2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R_2}{L_2} & \omega \\ \omega & -\frac{R_2}{L_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{d2} \\ i_{q2} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{E_{d2} - U_{dc}m_{d2}}{L_2} \\ \frac{E_{q2} - U_{dc}m_{q2}}{L_2} \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{m_{d1}i_{d1} + m_{q1}i_{q1}}{C} - \frac{m_{d2}i_{d2} + m_{q2}i_{q2}}{C} \quad (3)$$

式中, $E_{d1,2}$ 和 $E_{q1,2}$ 为两侧交流系统的端电压 dq 轴分量; $i_{d1,2}$ 和 $i_{q1,2}$ 为两侧交流电流的 dq 轴分量; ω 为系统角频率; U_{dc} 为直流侧电压; i_{dc} 为直流侧电流; $m_{d1,2}$ 和 $m_{q1,2}$ 为变流器开关调制函数的 dq 轴分量。

当柔性开关所连两侧的交流系统处于三相对称稳定且忽略其功率损耗时,柔性开关的功率输出方程为

$$\begin{cases} P_{FVS} = \frac{3}{2}(E_d i_d + E_q i_q) = U_{dc} i_{dc} \\ Q_{FVS} = \frac{3}{2}(E_q i_d - E_d i_q) \end{cases} \quad (4)$$

2. 控制策略

当交流系统处于三相平衡稳态时, $E_{d1,2}$ 为常数,而 $E_{q1,2}$ 近似为0,则由式(4)可知,柔性开关输出功率与 dq 轴电流分量成线性关系。据此将控制系统设计为内外双闭环控制结构,如图2所示。

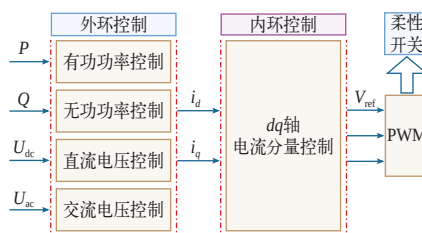


图2 柔性开关的双闭环控制策略示意图

其中,各外环依据柔性开关上层控制目标确定其网侧电流的 i_d 、 i_q 分量参考值;内环用于控制VSC输出调制电压,通过对调制电压基波分量的准确控制,可使柔性开关实际输出电流快速跟踪外环给定参考值,从而实现相应的控制目标。

柔性开关可根据实际需要交换两侧VSC的外环控制目标,实现对有功、无功功率或交流侧端电压的准确控制。但由式(3)、式(4)可知,只有在直流侧电压基本保持恒定时,流过柔性开关的有功功率才能平稳地传输。因此,柔性开关两侧控制需要相互协调,通常由一侧变流器维持直流电压稳定,另一侧调节传输有功功率的大小。

3. 动态响应特性

在PSCAD中搭建图1所示的柔性开关模型,测试其在双闭环控制策略下的动态响应特性。仿真参数设置如下:交流侧额定电压为10 kV,开关额定容量为2 MV·A, $R_{1,2}=0.01 \Omega$, $L_{1,2}=5 \text{ mH}$, $C=600 \mu\text{F}$, $U_{dc}=30 \text{ kV}$ 。阶跃测试下柔性开关各参数的动态响应曲线如图3所示。

由图3可见,直流侧电压在柔性开关调节有功功率传输大小时出现对应的两次扰动,是由于有功功率调节过程中两侧出现瞬时不平衡所导致的。当直流侧电压出现较大扰动时,会引起柔性开关两侧无功功率调节的小扰动,这是因为直流侧电压扰动会影响交流侧电压的生成。而无功功率在一定范围内的变化对于直流侧电压产生的影响相对较小。

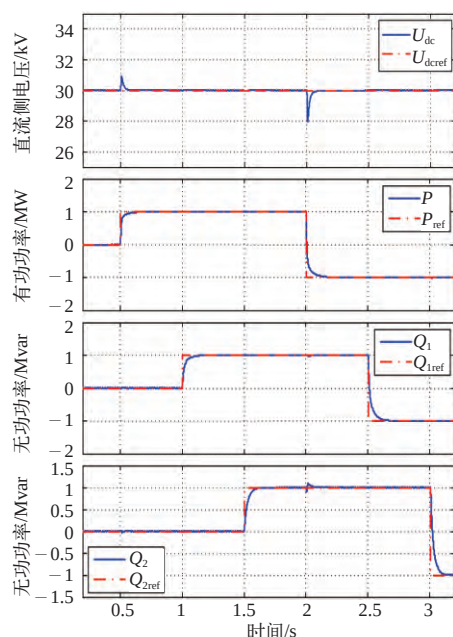


图3 柔性开关的动态响应特性

由上述仿真可知，柔性开关能快速准确地控制所传输的有功功率，且两侧变流器皆可四象限运行，可准确控制其吸收或发出的无功功率，为系统提供灵活的无功补偿，并能够在一定程度上改善交流侧系统的电压质量。

配电网潮流主动调控

1. 问题描述

配电网中开关一般包含两类：联络开关和分段开关。本文用柔性开关替换系统原有联络开关，作为基本功率控制单元来管理配电网的潮流分布。设置潮流调控优化目标为降低线路有功损耗和改善网络电压分布，可用数学表达式描述为

$$\min(g(x)) = \min\left(\sum_{i=1}^L R_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} + \sum_{k=1}^N b_k \left| \frac{V_k - V_n}{V_n} \right|^2\right) \quad (5)$$

式中， L 为线路总数； R_i 为支路电阻； P_i 为有功功率； Q_i 为无功功率； V_i 为功率注入节点的电压； b 为电压分布改善系数； N 为节点总数； V_k 为节点电压； V_n 为额定电压。

同时，配电网潮流主动调控应当满足如下约束条件。

(1) 配电网潮流约束

$$AP = D$$

式中， A 为节点—支路关联矩阵； P 为馈线潮流相量； D 为负荷需求相量。

(2) 节点电压约束

$$V_l < V_k < V_u \quad k = 1, \dots, N \quad (7)$$

式中， V_k 为节点电压； V_l 和 V_u 为节点电压上下限； N 为节点数。

(3) 柔性开关容量约束

$$P_{\text{FTS}}^2 + Q_{\text{FTS}}^2 \leq S_{\text{FTS}}^2 \quad (8)$$

式中， P_{FTS} 为流过开关的有功功率； Q_{FTS} 为开关提供的无功功率； S_{FTS} 为开关的额定容量。

(4) 线路容量约束

$$I_l \leq I_{\text{up}} \quad l = 1, \dots, L \quad (9)$$

式中， I_l 为线路电流； I_{up} 为线路电流承载的上限； L 为线路总数。

2. 混合粒子群优化算法

粒子群算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 通过模拟鸟群觅食行为来求解优化问题。在统计迭代过程中，粒子个体通过自身经验与同伴经验来修正寻优的方向和速度，具体过程可按下式表示^[6]

$$v_{id}^{k+1} = w^k v_{id}^k + c_1 \text{rand}() \cdot (P_{id} - x_{id}^k) + c_2 \text{rand}() \cdot (P_{gd} - x_{id}^k) \quad (10)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (11)$$

式中， $i = 1, \dots, M_p$ ， M_p 为群体中粒子的数量； v_{id}^k 和 x_{id}^k 为第 k 次迭代中第 i 个粒子在第 d 维分量上的速度和位置； c_1 和 c_2 为加速因子； $\text{rand}()$ 为产生范围在 $(0, 1)$ 间的随机数； p_{id} 和 p_{gd} 为当前个体和群体所发现的最优极值的 d 维分量； w 为惯性权重，为平衡算法的全局搜索能力与局部搜索能力可设为

$$w^k = w_{\min} + \frac{(w_{\max} - w_{\min})}{G}(G - k) \quad (12)$$

式中， G 为最大迭代次数； $w_{\max}$ 和 $w_{\min}$ 分别为最大、最小惯性权重。

考虑到传统PSO算法较易陷入局部最优解，故引入遗传算法中的交叉和变异操作，提高算法的全局搜索能力。即在寻优过程中，粒子个体先以PSO策略进行搜索，再结合遗传操作进行位置更新^[7]。这样既能保证粒子群的搜索效率，又提高

了算法的全局收敛性。混合粒子群算法 (Hybrid PSO, HPSO) 的主要流程如图4所示。

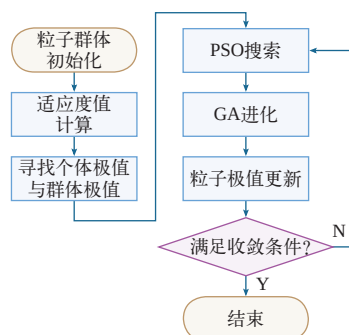


图4 混合粒子群算法流程图

3. 混合粒子群算法在潮流优化中的应用

(1) 粒子位置编码

以柔性开关为潮流控制单元，将流过开关的有功功率 (P_{sm}) 及其所提供的两侧无功功率 (Q_{1sm}, Q_{2sm}) 设为粒子的位置变量，即粒子的编码方式为 $\{P_{s1}, Q_{1s1}, Q_{2s1}, \dots, P_{sm}, Q_{1sm}, Q_{2sm}\}$ ，其中 m 表示柔性开关个数。

(2) 适应度函数

适应度函数的值是指导粒子群搜索前进方向的依据。潮流调控的目标是降低网络损耗与改善电压分布，属于极小值优化问题，如式 (5) 所示。综合考虑约束条件，则适应度函数可表示为

$$F = g(x) + p(x) \quad (13)$$

式中， $g(x)$ 为式 (5) 的目标函数； $p(x)$ 为违反约束条件的惩罚函数，用以减小违反约束条件的粒子进入下次迭代概率，其表达式为

$$p(x) = \sum_{i=1}^L \alpha_i (I_i - I_{lim})^2 + \sum_{k=1}^N \beta_k (V_k - V_{klim})^2 + \sum_{j=1}^M \gamma_j (S_j - S_{jlim}) \quad (14)$$

式中，三项表达式分别对应违反线路容量约束、违反节点电压约束和违反柔性开关容量约束的惩罚函数； α_i 、 β_k 和 γ_j 为各项权重系数； I_{lim} 为支路电流限值； V_{klim} 为节点电压限值； S_{jlim} 为柔性开关容量限值。

(3) 收敛条件

粒子群搜索收敛条件设置为连续 N 代 (N 为整

数，可依据需要进行适当调整，此处取 $N=5$)，群体最优适应度值的波动范围小于给定偏差，以及当前进化代数达到最大进化代数。

算例分析

以柔性开关为潮流调控的基本单元，结合混合粒子群算法对 IEEE 33 节点测试系统^[8] 进行潮流优化计算，模型结构如图5所示。系统额定电压为 12.66 kV，含 33 个节点，37 条支路，5 个联络开关，负荷总功率为 3 715 kW + j2 300 kvar。将原有联络开关替换为柔性开关，如图5中所示的 FTS33~FTS37。种群数量设置为 20，最大进化代数为 100，柔性开关容量大小为 500 kV·A，能量传输效率设为 97%，线路电流承载能力设置为 400 A。

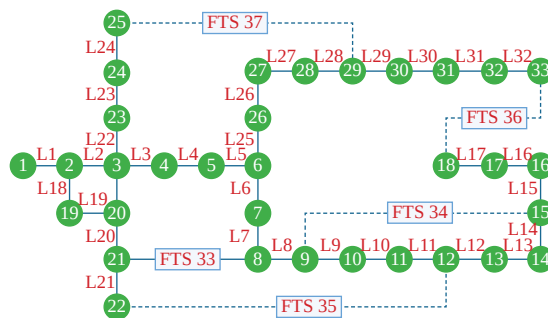


图5 含柔性开关的IEEE 33节点测试系统

潮流优化调控过程中考虑电压幅值变化对负荷功率大小的影响，负荷功率-电压依赖性采用式 (15)、式 (16) 所示模型。

$$P_{Load} = P_0 \left\{ a_p + b_p \frac{V}{V_0} + (1 - a_p - b_p) \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right\} \quad (15)$$

$$Q_{Load} = Q_0 \left\{ a_q + b_q \frac{V}{V_0} + (1 - a_q - b_q) \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right\} \quad (16)$$

式中， P_0 和 Q_0 为对应原始电压 V_0 的负荷功率； P_{Load} 和 Q_{Load} 为对应实际电压 V 的负荷功率； a_p 和 a_q 为功率型负荷系数； b_p 和 b_q 为电流型负荷系数； $1 - a_p - b_p$ 和 $1 - a_q - b_q$ 为阻抗型负荷系数。设 $a_p = a_q = 0.7$ ， $b_p = b_q = 0.2$ 。

基于柔性开关的配电网潮流主动调控仿真结果如图6~图8所示。图6为算法适应度函数值和网络损耗在迭代过程中的变化曲线，图7为原始网络电压分布与优化得到电压分布的比较示意图，图8

为最终优化结果所对应的柔性开关的有功/无功功率的输出值。

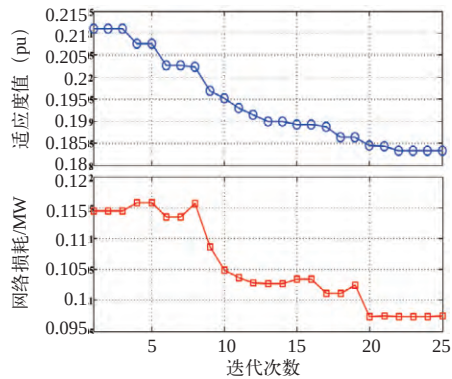


图6 主动潮流调控运行结果

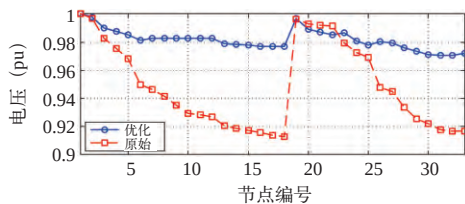


图7 原始网络电压分布与优化电压分布的比较

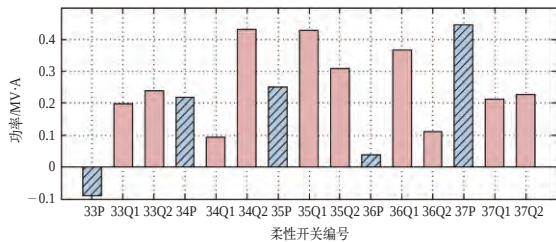


图8 柔性开关33~37的有功/无功功率输出值

在不同负荷程度的场景下进行主动潮流调控，优化结果如下表所示。

表 不同负荷程度下潮流调控优化结果			
负荷程度系数 (pu)	0.5	1.0	1.5
最优适应度值 (pu)	0.062	0.183	0.373
优化后网络损耗值/MW	0.038	0.097	0.217
柔性开关自身损耗/MW	0.010	0.026	0.040
最大电压偏差 (%)	0.91	2.95	6.18
原始潮流下的损耗值/MW	0.047	0.203	0.496
原始潮流下的最大电压偏差 (%)	4.17	8.70	13.66

由仿真结果可知，基于柔性开关的潮流主动调控能够有效地均衡配电网的负荷分布，降低线路损耗，提高供电电压质量。特别是在负荷较重的情况下，对网络损耗与电压偏差的改善尤为明显。

结束语

本文首先对柔性开关的动态功率调控特性进行了具体分析，进而结合混合粒子群优化算法研究了其在配电网潮流主动调控中的作用，结果表明柔性开关的应用能够有效降低网络损耗与改善电压分布。

目前，电力电子器件成本昂贵仍是制约柔性开关此类设备规模化商业应用的重要因素。但随着电力电子技术的不断发展完善，立足于主动配电网的发展需求，柔性开关有望在配电网中逐步得到应用，可作为重要的调控手段，灵活地控制潮流分配和调整网架结构，从而提高配电系统的运行水平。

参考文献

[1] 孔涛,程浩忠,李钢,等. 配电网规划研究综述[J]. 电网技术, 2009 (19) : 92-99.

[2] 王林川,梁峰,李漫,等. 含有分布式电源配电网重构算法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011 (5) : 41-44, 50.

[3] 范明天,张祖平,苏傲雪,等. 主动配电系统可行技术的研究[J]. 中国电机工程学报, 2013 (22) : 12-18, 5.

[4] 蒋桂强. 背靠背电压源型变流器的控制器设计及性能分析[D]. 吉林: 东北电力大学, 2009.

[5] 李建林,王立乔,熊宇,等. 三相电压型变流器系统静态数学模型[J]. 电工技术学报, 2004, 19 (7) : 11-15.

[6] 李振坤,陈星莺,余昆,等. 配电网重构的混合粒子群算法[J]. 中国电机工程学报, 2008 (31) : 35-41.

[7] 贾建芳,杨瑞峰,王莉. 混合遗传粒子群优化算法的研究[J]. 自动化仪表, 2013 (9) : 1-3.

[8] Baran M E, Wu F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4 (2) : 1401-1407.

(收稿日期: 2014-07-09) EA