

馈线控制误差及其 在主动配电网协调控制中的应用

于文鹏¹, 刘东¹, 余南华²

(1. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学), 上海市 闵行区 200240;

2. 广东电网公司电力科学研究院, 广东省 广州市 510080)

Feeder Control Error and Its Application in Coordinate Control of Active Distribution Network

YU Wenpeng¹, LIU Dong¹, YU Nanhua²

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University,
Minhang District, Shanghai 200240, China;

2. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: With the integration of distributed generation (DG) and energy storage system (ESS), the active control system of distribution network should have the ability to reconcile global optimization and local autonomy of distribution network by actively managing the operations of DG, ESS and distribution network. Indicator of feeder control error (FCE) was proposed to represent differences between actual operating status and global optimized status. Constant interchange control mode and object tracking control mode based on FCE were presented for local autonomy control based on the global optimization. The effectiveness of the coordinate control methods of active distribution network based on FCE were verified by theoretical analysis and simulation.

KEY WORDS: active distribution network (ADN); feeder control error (FCE); coordination control; distributed generation (DG); energy storage system (ESS)

摘要: 配电网接入分布式电源、储能系统后,其主动控制系统须同时兼顾全局优化与局部自治控制的要求,具有对各分布式电源、储能以及配电网运行方式的主动调节能力。提出馈线控制误差(feeder control error, FCE)指标,实时描述主动配电网实际运行状态与最优运行状态的差异,并基于FCE提出了定交换功率控制和追踪目标控制两种控制模式下的主动配电网的协调控制,实现全局优化基础上的局部协调控

制。最后通过算例仿真分析,验证了基于FCE的主动配电网协调控制模式的有效性。

关键词: 主动配电网; 馈线控制误差; 协调控制; 分布式电源; 储能系统

0 引言

在接入分布式电源(distributed generation, DG)、储能系统(energy storage system, ESS)后,配电网具备了一定的主动调节、优化负荷的能力。可再生能源具有间歇性或波动性等特点,限制了DG的并网运行,需对DG的控制、调度进行协调^[1-2]。对配电网及并网DG、储能的主动管理能够提高DG的并网数量与运行效益^[3-5]。具有主动管理能力的配电网为主动配电网(active distribution network, ADN),其特点是能够主动地对并网DG、储能、无功补偿等设备的运行进行优化与控制。

ADN优化控制一般分为全局优化计算与DG、储能、微网的实时控制两部分。在全局优化与实时控制方面,均有较多的研究,如改进的基于P-f与Q-V下垂控制的控制策略^[6-8]、储能与间歇式能源协调控制以抑制DG功率波动^[9-12]等实时控制;以及基于储能削峰填谷功能的经济运行优化^[13]与储能最优调度^[14-15]、冷热电联供运行策略优化^[16-17]、考虑线损、电能成本、无功补偿成本等因素的主动配电网运行优化^[18-19]。

基金项目: 国家863高技术基金项目(2012AA050212); 上海市科技攻关重点项目(10dz1202800)。

The National High Technology Research and Development of China 863 Program (2012AA050212); Key Research Program of Shanghai of China (Issue number: 10dz1202800).

实现 ADN 的主动优化与控制,须同时兼顾全局优化与局部自治控制的要求。全局优化根据 ADN 全局信息计算各 DG、储能及配电网最优运行状态;局部自治则是在全局优化基础上,根据电网实际运行状态进行局部协调自治。由于全局优化计算一般采用历史数据或预测数据,无法与实际运行状态完全一致,且全局优化计算与实时控制对响应时间的要求有差异,因此需研究在全局优化基础上实现局部协调自治,使 ADN 实际运行状态与最优状态保持相近。文献[20]提出了 24 h 长周期优化计算与 15 min 短周期优化调整相结合的 DG 优化运行方案,但没有解决全局优化基础上的局部协调自治的问题。在优化计算周期内,配网负荷、可再生能源会发生计划外变化。这种情况下需有局部协调自治来维持 ADN 整体运行状态与最优运行状态相近。

外电网与主动配电网的交换功率起到维持 ADN 功率平衡的作用,可从整体上衡量 ADN 负荷、DG 实际运行状态。基于该交换功率及全局优化中 DG、储能的最优运行状态,本文将提出馈线控制误差(feeder control error, FCE)指标,从整体上定量描述 ADN 实际运行状态与全局优化的运行状态之间的差异;基于 FCE,提出局部协调控制的不同控制模式,及相应的控制方程与 FCE 计算模型,进而提出分布式电源、外电网功率调节分配系数的概念;最后以理论分析及仿真的形式进行验证,并讨论 DG 功率爬坡率相差悬殊、部分 DG 功率达到上限等特殊情况下的控制过程与结果。

1 馈线控制误差概念及应用

1.1 馈线控制误差

对于主动配电网,外电网可近似为无穷大电源,维持 ADN 功率平衡。若并网 DG 输出功率及负荷确定,根据潮流计算可唯一的确定 ADN 与外电网的交换功率(下文均用 P_E 表示)。当负荷发生计划外的变化时,或 DG、储能系统与最优运行状态有差异时, P_E 亦随之改变。因此 P_E 可以反映 ADN 整体运行状态。并且在 ADN 全局优化控制中, P_E 也往往是优化模型需要重点考虑的一个方面。

定义:馈线控制误差为 P_E 实际值与最优值或全局优化的计划值之差,即

$$P_{FCE} = P_{E,C} - P_{E,S} \quad (1)$$

式中: $P_{E,S}$ 为 P_E 最优值或全局优化的计划值,根据全局优化计算得到; $P_{E,C}$ 为运行中 P_E 的实测值。

$P_{E,C}$ 、 $P_{E,S}$ 均以注入 ADN 为正。

FCE 的提出,量化描述了 ADN 实际的整体运行状态与全局优化的整体运行状态之间的差异。实际运行中,若负荷功率及 DG、储能实际功率与全局优化相同,那么 $P_{FCE}=0$; $P_{FCE}>0$ 则表明负荷功率增大或 DG、储能输出功率减小;反之 $P_{FCE}<0$ 表明负荷功率减小或 DG、储能输出功率增大。在不同的控制模式下,根据 FCE 的符号及绝对值大小或 FCE 对时间的积分值,协调控制各 DG 与储能系统,使实际运行状态趋近于全局优化的运行状态。

由式(1)提出的 FCE 仅考虑了交换功率 P_E 的实际值与最优值之间的差异,其控制模式为定交换功率控制模式,在第 2 节中进行详细论述。

然而在 ADN 优化与控制中,各 DG、储能最优输出功率是需要重点考虑的内容。综合考虑及 DG、储能最优输出功率的 FCE 定义为

$$P_{FCEi} = \frac{1}{K} \Delta P_{E,Err} + \frac{1}{\alpha_i} \Delta P_{i,Err} \quad (2)$$

式中: P_{FCEi} 为 DG i 的 FCE 值; $\Delta P_{E,Err}$ 为 P_E 控制误差, $\Delta P_{E,Err} = P_{E,C} - P_{E,S}$, 符号含义与式(1)中相同; $\Delta P_{i,Err}$ 为 DG i 功率控制误差,计算模型为 $\Delta P_{i,Err} = P_{i,C} - P_{i,S}$, 其中 $P_{i,C}$ 为 DG i 实际功率,以流出主动配电网为正, $P_{i,S}$ 为 DG i 功率最优值或全局优化计划值;常数 K 、 α_i 为功率调节分配系数,其具体含义及相应的控制模式将在第 3 节中详细论述。

DG 爬坡率不同、部分 DG 功率达到上限的特殊情况下的控制过程与控制结果将分别在第 3、4 节进行讨论。

FCE 指标及控制模式主要是用来实现 DG、储能的局部协调控制,使其运行状态与最优运行状态或全局优化的计划状态相近。而如何通过优化算法得到最优运行状态或全局优化计划状态,非本文讨论重点,将另文叙述。

1.2 馈线控制误差应用场景

FCE 在主动配电网协调控制中的应用策略如图 1 所示。优化或运行计划系统根据负荷、风、光预测等数据,计算未来一段时间内的 ESS、可调 DG 输出功率及 ADN 与外电网的交换功率最优值;FCE 协调系统根据交换功率最优值及实测值计算馈线误差,根据 ESS、DG 功率最优值与实测值计算 ESS、DG 运行误差,并以不同控制模式计算 ESS、DG 在 FCE 协调控制下的功率值。

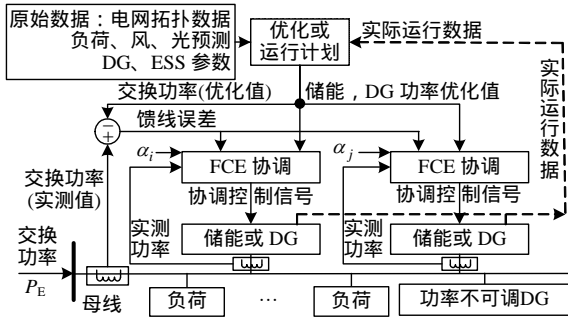


图1 FCE的应用示意图

Fig. 1 Schematic diagram of FCE's application

优化或运行计划可根据算法复杂度以固定时间为周期进行计算。而 FCE 协调系统实时采集电网运行状态数据, 计算控制误差, 并根据式(7)或(9)确定的控制方程对 ESS、可调 DG 进行实时协调控制。

2 基于 FCE 的定交换功率控制模式

定交换功率控制模式是以交换功率 P_E 实际值与全局优化的计划值相同为控制目标的控制模式, 各 DG、储能系统根据预定的功率调节分配系数调节输出功率。

DG、储能系统控制方程如式(3)所示:

$$\int_0^t P_{FCE} dt + K_i \Delta P_i = 0 \quad (3)$$

式中: K_i 为常数; P_i 、 ΔP_i 为主动配电网中 DG i 功率及其调节量, 以流出馈线为正方向。可控负荷或等效为单个节点的微网等功率可调的设备或等效节点, 也可采用 FCE 积分控制。

先以单 DG 的 ADN 为例(如图 2 所示), 分析定交换功率控制模式的控制过程。ADN 中接入了不可调负荷, 预测其功率为 P_{Load} ; 外电网向主动配电网注入功率为 P_E 。根据 ADN 全局优化, DG 功率为 P_{DG} , P_E 全局优化的计划值为 $P_{E,S} = P_{Load} + P_{DG}$, 若忽略损耗, $P_{FCE} = 0$ 。若某一时刻馈线负荷计划外地增大 ΔP_{Load} , 此时 $P_{FCE} = \Delta P_{Load} > 0$ 。根据 DG 控制方程可知 $\Delta P_{DG} = -(\int_0^t P_{FCE} dt) / K$, $\Delta P_{DG} < 0$, DG 并网节点流出馈线的功率减小, 即 DG 注入馈线功率增大, 使 P_{FCE} 减小。当 P_{FCE} 减小至 0 时, 功率调节过程结束, 此时有

$$\Delta P_{DG} = -\frac{1}{K} \int_0^t P_{FCE} dt = -\Delta P_{Load} \quad (4)$$

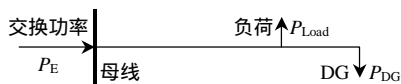


图2 主动配电网示意图(单 DG)

Fig. 2 Diagram of ADN (with single DG)

在该控制过程中, FCE 反映了负荷的计划外增大, 通过 FCE 积分控制增大 DG 输出功率, 使 P_E 与计划值相同。

当主动配电网中接入 n 个 DG 时, 如图 3 所示, DG i 功率变化量为

$$\Delta P_i = -\frac{1}{K_i} \int_0^t P_{FCE} dt = -\frac{1}{K_i} C \quad (5)$$

式中 $C = \int_0^t P_{FCE} dt$, 对不同的 DG 均相同。因此可推知对于任意的 DG i, j , 其功率调节量的比值为:

$\Delta P_i / \Delta P_j = (1/K_i) / (1/K_j)$ 。令 $\Delta P = \sum_{i=1}^n \Delta P_i$, 为所有 DG、储能功率调节量之和, 则有

$$\begin{cases} \Delta P_i = \alpha_i \Delta P \\ \alpha_i = \frac{1}{K_i} \\ \sum_{j=1}^n \frac{1}{K_j} \end{cases} \quad (6)$$

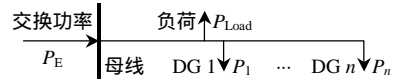


图3 多 DG 接入的主动配电网示意图

Fig. 3 Diagram of ADN (with multiple DG)

在式(6)中, 定义 α_i 为功率调节分配系数, 为 DG i 功率调节量占总调节量的比例, 且有 $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$ 。

当出现计划外的负荷、功率注入时, DG 根据 FCE 及功率调节分配系数确定输出功率的变化量。可综合考虑各 DG 类型、容量、是否可调、发电成本等信息, 根据不同的优化控制策略, 设定各 DG 的功率调节分配系数。

根据式(3)、(6), ADN 中 DG 控制方程可改为

$$\int_0^t P_{FCE} dt + \frac{1}{\alpha_i} \Delta P_i = 0 \quad (7)$$

在由式(3)或(7)确定的控制模式中, 当出现计划外的负荷波动或 DG 功率波动时, DG 功率调节过程的终点为 $P_{FCE} = 0$, 即 $P_{E,C} = P_{E,S}$, P_E 实际值与计划值一致(除非所有 DG 功率均已调节至上限), 因此称为定交换功率控制模式。

在定交换功率控制模式中, 各 DG 按照功率调节分配系数进行协调控制。然而, 主动配电网全局优化的计算结果中往往会包含 DG 输出功率的最优值, 而定交换功率控制模式并无法体现各 DG 输出

功率最优值。综合考虑 P_E 及 DG 输出功率最优值的控制模式在第 3 节中进行论述。

3 基于 FCE 的追踪目标控制模式

ADN 优化与控制不仅需要关注交换功率 P_E ，还需要使各 DG 实际输出功率与其最优值相近。综合考虑 P_E 及 DG 输出功率最优值的控制模式称为追踪目标控制模式。在该控制模式下，ADN 出现计划外的负荷变化时，FCE 指标综合描述 ADN 整体运行状态与 DG 状态，使 DG、储能各自全局最优输出功率基础上，根据 FCE 指标中预定的系数调节输出功率，共同平衡计划外的负荷变化。

追踪目标控制模式下 FCE 计算模型为式(2)，为便于讨论分析，引用为式(8)：

$$P_{FCEi} = \frac{1}{K} \Delta P_{E,Err} + \frac{1}{\alpha_i} \Delta P_{i,Err} \quad (8)$$

式中： K 为正常数； α_i 为 DG i 功率调节分配系数，定义与式(6)、(7)相同。

追踪目标控制模式控制方程为

$$\int_0^t \left(\frac{1}{K} \Delta P_{F,Err} + \frac{1}{\alpha_i} \Delta P_{i,Err} \right) dt + \Delta P_i = 0 \quad (9)$$

若某一时刻主动配电网中出现计划外负荷变化 ΔP ，那么，考虑到 $\Delta P_{E,Err}$ 、 $\Delta P_{i,Err}$ 的正方向并忽略损耗，根据功率平衡可知：

$$\Delta P = \Delta P_{E,Err} - \sum_{i=1}^n \Delta P_{i,Err} \quad (10)$$

ADN 功率调节过程结束时， $P_{FCEi}=0$ ，且有 $\Delta P_E = \Delta P_{E,Err}$ ， $\Delta P_i = \Delta P_{i,Err}$ ，结合式(8)可知：

$$\Delta P_i = -\frac{\alpha_i}{K} \Delta P_E, \quad i=1,2,\dots,n \quad (11)$$

通过式(10)、(11)可知

$$\Delta P = \frac{1}{K} \left(K + \sum_{i=1}^n \alpha_i \right) \Delta P_E \quad (12)$$

与式(6)、(7)相同，式(12)中 α_i 为 DG 功率调节分配系数，且 $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$ ；定义 K 为外电网功率调节分配系数，由式(11)、(12)可知功率调节结束后有：

$$\begin{cases} \Delta P_E = \frac{K}{1+K} \Delta P \\ \Delta P_i = \frac{-\alpha_i}{1+K} \Delta P \end{cases} \quad (13)$$

式(13)即为基于 FCE 的追踪目标控制模式下，

各 DG 及外电网的功率调节分配方程。当 ADN 出现计划外负荷 ΔP 时，由外电网与 DG 共同调整功率平衡，其比例为 $K/(1+K)$ 与 $\alpha_i/(1+K)$ 。

功率调节过程中，若部分 DG 功率已调节至其限定值，那么其余 DG 及交换功率 P_E 仍按照功率调节分配系数的比例进行调节。若 F 为功率达到上限的 DG 集合，那么未达到上限的 DG 的功率调节量如式(14)所示，其中 ΔP 为 ADN 总负荷改变量。

$$\Delta P_i = \frac{\alpha_i}{K + \sum_{j \notin F} \alpha_j} (\Delta P - \sum_{j \in F} \Delta P_j) \quad (14)$$

4 算例仿真分析

4.1 算例

以简单 ADN 网络为算例，其中接入 2 个 DG，5 个负荷，使用 Matlab Simulink 搭建一次电网模型及控制回路模型，验证本文提出的基于 FCE 的定交换功率控制模式与追踪目标控制模式。算例拓扑连接如图 4 所示，仿真模型电网连接如图 5 所示，其中，外电网等效为恒压源。

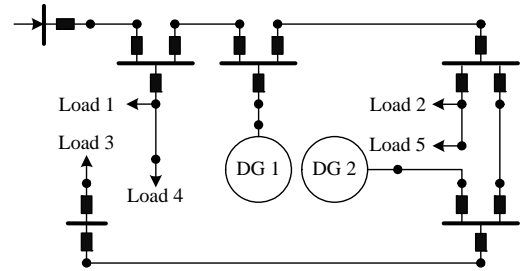


图 4 算例电网拓扑连接

Fig. 4 Topological connection of the grid in case study

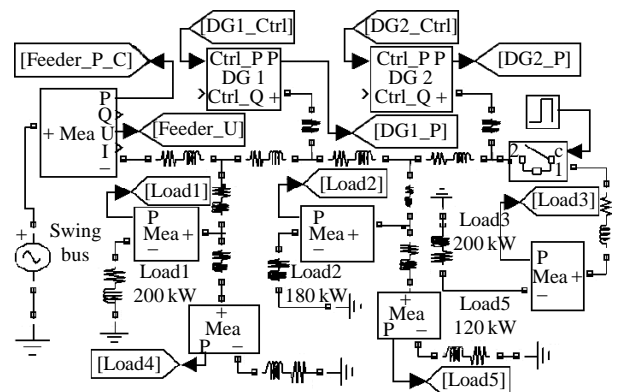


图 5 Matlab 仿真模型接线图

Fig. 5 Diagram of the grid in Matlab Simulink

本文提出的基于 FCE 的协调控制，用于连接优化计算与 DG 的实时控制，并不着重研究 DG 内部控制方式。因此，在仿真模型中，认为 DG 是包含

了控制回路的设备,能够按照指定的控制目标调整自身的运行;其控制目标由基于 FCE 的控制回路进行实时协调计算。

在仿真中使用可控电流源搭建了输出功率可控的 DG 模型,用于模拟功率可控 DG 的一般特性,其接线图及控制回路如图 6 所示。图中的输入信号“ In1 ”“ In2 ”为 DG 有功功率与无功功率控制目标,根据控制目标采用闭环的比例积分控制,实现 DG 功率可控。

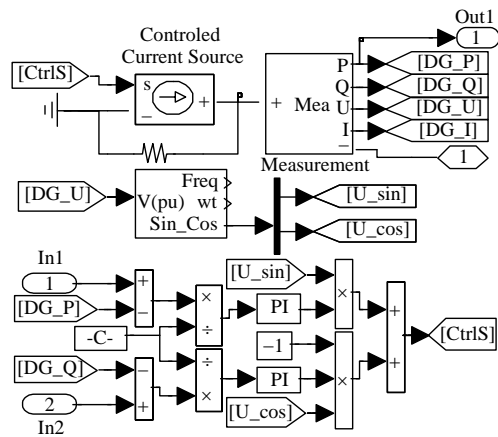


图 6 DG 模型接线及控制回路

Fig. 6 Primary connection and control loop of DG

4.2 定交换功率控制模式

各负荷功率如表 1 所示,其中负荷 Load3 在 1 时接入电网,2 时脱离电网,用于模拟电网负荷变化。各分布式电源功率调节分配系数如表 2 所示。

表 1 仿真模型各负荷功率

Tab. 1 Active power of load in the simulation	
负荷	有功功率/kW
Load 1	200
Load 2	180
Load 3	200
Load 4	150
Load 5	120

表 2 DG 功率调节分配系数

Tab. 2 Factors of power adjustment of DG	
分布式电源	功率调节分配系数
DG 1	0.7
DG 2	0.3

FCE 的计算及 DG 控制回路如图 7 所示,其中 Feeder_P_C 为配电线路与外电网等效电源交换功率的实测值,Feeder_P_S 为交换功率的计划值,在仿真中设定为 300 kW。各 DG 控制采用式(7)提出的定交换功率控制模式。

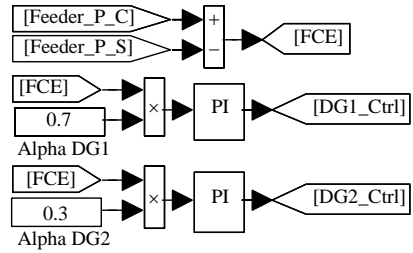


图 7 定交换功率控制模式 FCE 计算及各 DG 控制回路

Fig. 7 Diagram of FCE calculation and DG control loop of constant interchange control

仿真结果如图 8 所示,其中 Feeder_P_C 为交换功率曲线。当 Load3 接入或断开后,通过 FCE 积分控制各 DG 输出功率相应改变,在功率调节过程结束后交换功率 P_E 维持在 300 kW,与计划值相同,实现了定交换功率控制。

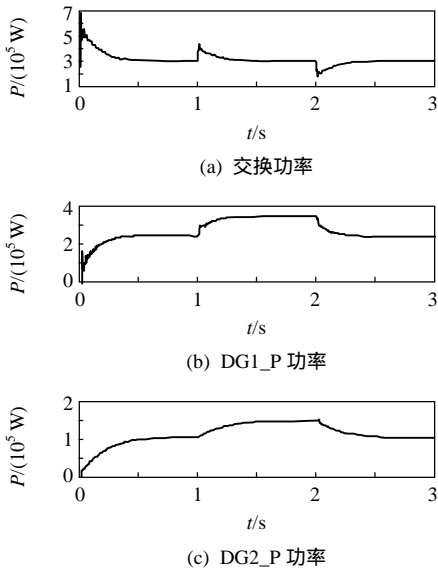


图 8 定交换功率控制模式 DG 功率曲线

Fig. 8 Active power curve of DG in the simulation of constant interchange control

DG1_P 与 DG2_P 分别为 2 个 DG 的有功功率,如表 3 所示。DG1、DG2 的功率调节分配系数分别为 0.7 与 0.3,而 Load3 接入后,DG1、DG2 功率分别增大 101 与 44 kW,其比值对功率调节分配系数的比值相同。

表 3 负荷、DG 及馈线实际功率

Tab. 3 Power of load and DG at different time				
时间区间/s	实际总负荷/kW	交换功率/kW	DG1 功率/kW	DG2 功率/kW
0~1	651	300	247	106
1~2	799	300	348	150
2~3	651	300	247	106

修改 DG1、DG2 的爬坡率,使 DG2 爬坡率远大于 DG1,用于仿真 DG 爬坡率对协调控制结果的

影响。Load 3 始终接入电网,仿真结果如图 9 所示。由于 DG2 功率增长快, DG1 功率增长慢,在 $T=0.5\text{ s}$ 时, DG2 已“超额”完成其功率调节量,而 DG1 尚未完成功率调节。在 $0.5\sim 2\text{ s}$ 时间段,随着 DG1 功率的继续增大,是 FCE 小于 0, DG2 功率相应减小。当功率调节全部完成后, DG1、DG2 实际功率分别为 349 与 149 kW,其比例仍然满足设定的功率调节分配系数。因此可知 DG 爬坡率在控制过程中会出现影响,但不影响最终控制结果。

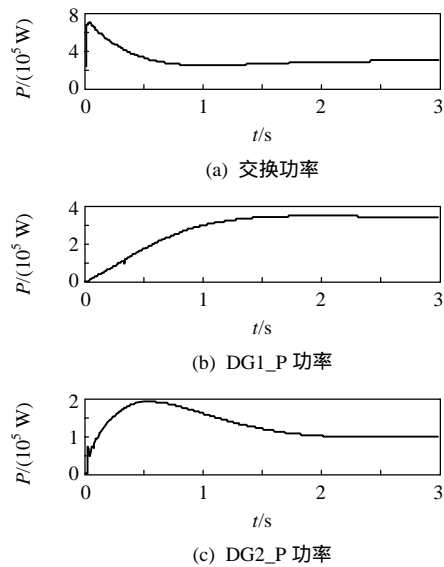


图 9 不同功率爬坡速度下 DG 功率曲线

Fig. 9 Power curves of DG with different ramp rate

4.3 追踪目标控制模式

根据式(8)、(9)提出的 FCE 计算模型与控制方程, FCE 计算回路及 DG 控制系统如图 10 所示。设定 DG 输出功率及交换功率的最优值以及功率调节分配系数,如表 4 所示。

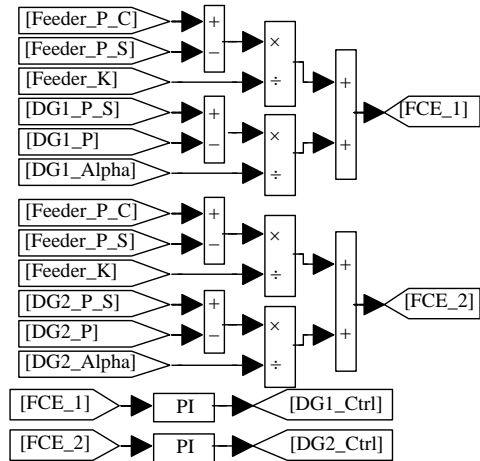


图 10 追踪目标控制模式 FCE 计算及 DG 控制回路

Fig. 10 Diagram of FCE calculation and DG control loop of object tracking control

表 4 DG 与外电网计划功率及功率调节分配系数

Tab. 4 Factor of power adjustment and power of DG

各功率	计划功率/kW	调节分配系数
交换功率	300	0.2
DG 1	247	0.7
DG 2	106	0.3

仿真结果如图 11 所示,分别为交换功率、DG1、DG2 有功功率曲线。各时间段交换功率及 DG 有功功率如表 5 所示。

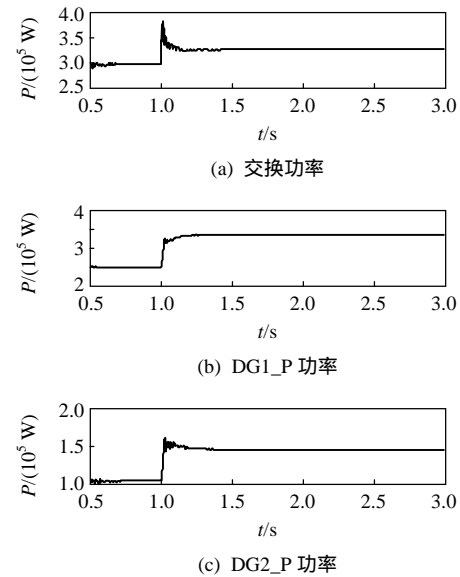


图 11 追踪目标控制模式下 DG 功率

Fig. 11 Power curve of DG in object tracking control

表 5 追踪目标控制模式下 DG、负荷功率

Tab. 5 Power of DG and load in object tracking control

时间区间/s	实际总负荷/kW	交换功率/kW	DG1 功率/kW	DG2 功率/kW
0~1	651	299.7	246.3	105.7
1~3	799	324.2	331.7	142.3
计划值	651	300.0	247.0	106.0

0~1 s 时间段内,馈线交换功率及各 DG 功率与其最优值相同, $T=1\text{ s}$ 时, Load 3 接入电网,增加的负荷为 148 kW,交换功率、DG 功率与其最优值相比,分别增加 24.2、84.7 和 36.3 kW,功率调节量的比例与功率调节分配系数的比例相同。验证了功率调节分配系数的有效性。

在该控制模式下,设定了各 DG 的最优输出功率。Load3 接入后,各 DG 在最优输出功率的基础上按比例进行调整。在实际应用中,根据各 DG 的类型、容量等信息设定功率调节分配系数,使计划外的负荷较优的由各 DG 及外电网分担。

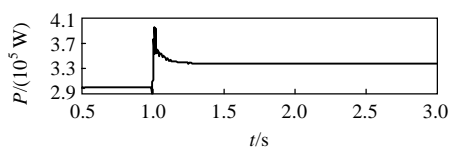
设定 DG1 的最大输出功率为 300 kW,以仿真部分 DG 输出功率达到上限的情况。其余参数不变,

各 DG 功率曲线如图 12 所示,各时间段内 DG 功率、交换功率如表 6 所示。在 1~3 s 时间段内, DG1 输出功率达到其最大值 300 kW, 交换功率与 DG2 功率变化量分别为 36.7 与 54.6 kW, 其比例仍然与功率调节分配系数比例相同, 约为 2:3, 与式(15)提出的控制结果相同,验证了基于 FCE 的控制方式在部分 DG 功率达到上限后仍能有效协调其余 DG。

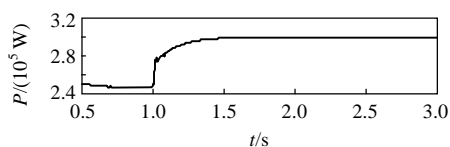
表 6 部分 DG 输出达到上限的 DG 与负荷功率

Tab. 6 Power of DG and load with constraint of rated output power

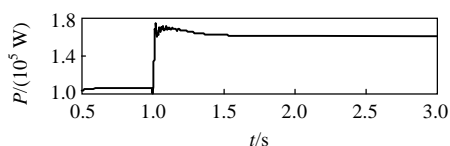
时间区间/s	实际总负荷/kW	交换功率/kW	DG1 功率/kW	DG2 功率/kW
0~1	651	299.7	246.3	105.7
1~3	799	336.0	300.0	161.3
计划值	651	300.0	247.0	106.0



(a) 交换功率



(b) DG1_P 功率



(c) DG2_P 功率

图 12 DG 输出达到上限的仿真结果

Fig. 12 Simulation result with constraint of rated output

5 结论

1) 提出了馈线控制误差(FCE)指标,并提出基于 FCE 的定交换功率控制模式与追踪目标控制模式,以及相应的控制方程、FCE 计算模型以及功率调节分配系数。

2) 定交换功率控制模式,相对于交换功率为一种无偏差控制。在并网 DG 功率调节范围内,各 DG 按照其功率调节分配系数调节输出功率,直至交换功率的实际值与最优值或全局优化的计划值保持一致,或 DG 功率均达到其上限。

3) 追踪目标控制模式,不仅考虑交换功率的最优值,还考虑了 DG 输出功率的最优值。出现计划外负荷时,DG 在各自输出功率的最优值基础上,

按照 FCE 指标中预设的功率调节分配系数平衡计划外负荷。若部分 DG 功率达到上限值,其余 DG 仍可得到有效地协调控制。

4) FCE 的提出,量化描述了主动配电网实际运行状态与全局优化的运行状态之间的差异。提供了根据主动配电网整体运行状态实时协调各 DG 运行的一种方式,实现主动配电网全局优化基础上的局部协调控制。

参考文献

- [1] 尤毅,刘东,于文鹏,等.主动配电网技术及其进展[J].电力系统自动化,2012,36(18):10-16.
You Yi, Liu Dong, Yu Wenpeng, et al. Research on active distribution network technology & ITS development[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 10-16(in Chinese).
- [2] Siano Pierluigi, Chen Peiyuan, Chen Zhe, et al. Evaluating maximum wind energy exploitation in active distribution networks[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2010, 4(5): 598-608.
- [3] Peças Lopes J A, Hatziargyriou N, Mutale J, et al. Integrating distributed generation into electric power systems: a review of drivers, challenges and opportunities[J]. Electric Power Systems Research, 2007, 77(9): 1189-1203.
- [4] Currie R A F. Fundamental research challenges for active management of distribution networks with high levels of renewable generation[C]//Universities Power Engineering Conference, 2004: 1024-1028.
- [5] Liu Dong, You Yi, Liao Huaqing, et al. Mechanism analysis of voltage quality deterioration for grid-connected photovoltaic system and improvement strategy[J]. International Review of Electrical Engineering-IREE, 2012, 7(2): 4221-4225.
- [6] 王成山,高菲,李鹏,等.低压微网控制策略研究[J].中国电机工程学报,2012,32(25):2-8.
Wang Chengshan, Gao Fei, Li Peng, et al. Control strategy research on low voltage microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 2-8(in Chinese).
- [7] 李福东,吴敏.微网孤岛模式下负荷分配的改进控制策略[J].中国电机工程学报,2011,31(13):18-25.
Li Fudong, Wu Min. An improved control strategy of load distribution in an autonomous microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 18-25(in Chinese).
- [8] 杨秀媛,黄丹,申洪.多能源互补独立电力系统的控制策略仿真研究[J].中国电机工程学报,2013,33(4):156-162.
Yang Xiuyuan, Huang Dan, Shen Hong. Research on control strategy of multi-energy complementary isolated

- power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 156-162(in Chinese).
- [9] 廖志凌, 阮新波. 独立光伏发电系统能量管理控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(21): 46-52.
Liao Zhiling, Ruan Xinbo. Energy management control strategy for stand-alone photovoltaic power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(21): 46-52(in Chinese).
- [10] 侯世英, 房勇, 孙韬, 等. 混合储能系统在独立光伏发电系统功率平衡中的应用[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 183-187.
Hou Shiying, Fang Yong, Sun Tao, et al. Application of Hybrid Energy Storage System in Power Balance of Stand-Alone Photovoltaic Power System[J]. Power System Technology, 2011, 35(5): 183-187(in Chinese).
- [11] 卢继平, 白树华. 风光氢联合式独立发电系统的建模及仿真[J]. 电网技术, 2007, 31(22): 75-79.
Lu Jiping, Bai Shuhua. Modeling and simulation of conjoint independent power generation system consisting of power generation by wind energy, solar energy and hydrogen energy[J]. Power System Technology, 2007, 31(22): 75-79(in Chinese).
- [12] 刘霞, 江全元. 风光储混合系统的协调优化控制[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 95-100.
Liu Xia, Jiang Quanyuan. An Optimal coordination control of hybrid wind/photovoltaic/energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 95-100(in Chinese).
- [13] 丁明, 张颖媛, 茆美琴, 等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 7-14.
Ding Ming, Zhang Yingyuan, Mao Meiqin, et al. Economic operation optimization for microgrids including Na/S battery storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 7-14(in Chinese).
- [14] 陈满, 陆志刚, 刘怡等. 电池储能系统恒功率削峰填谷优化策略研究[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 232-237.
Chen Man, Lu Zhigang, Liu Yi, et al. Research on optimal peak load shifting strategy of battery energy storage system operated in constant power mode[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 232-237(in Chinese).
- [15] 鲍冠南, 陆超, 袁志昌等. 基于动态规划的电池储能系统削峰填谷实时优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(12): 11-16.
Bao Guannan, Lu Chao, Yuan Zhichang, et al. Load shift real-time optimization strategy of battery energy storage system based on dynamic programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(12): 11-16(in Chinese).
- [16] 荆有印, 白鹤, 张建良. 太阳能冷热电联供系统的多目标优化设计与运行策略分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(20): 82-87.
Jing Youyin, Bai He, Zhang Jianliang. Multi-objective optimization design and operation strategy analysis of a solar combined cooling heating and power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(20): 82-87(in Chinese).
- [17] 周任军, 冉晓洪, 毛发龙, 等. 分布式冷热电三联供系统节能协调优化调度[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 8-14.
Zhou Renjun, Ran Xiaohong, Mao Falong, et al. Energy-saving coordinated optimal dispatch of distributed combined cool, heat and power supply[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 8-14(in Chinese).
- [18] Pilo F, Pisano G, Soma G G. Optimal coordination of energy resources with a two-stage online active management[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(10): 4526-4537.
- [19] Currie R A F, Ault G W, Foote C E T. Active power-flow management utilising operating margins for the increased connection of distributed generation[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2007, 1(1): 197-202.
- [20] Borghetti A, Bosetti M, Grillo S, et al. Short-term scheduling and control of active distribution systems with high penetration of renewable resources[J]. IEEE Systems Journal, 2010, 4(3): 313-322.



于文鹏

收稿日期：2012-10-28。

作者简介：

于文鹏(1982), 男, 博士研究生, 主要研究方向为智能配电网, yuwenpeng@outlook.com;

刘东(1968), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 教育部新世纪优秀人才, 本文通信作者, 主要研究方向为智能电网、电网的信息物理融合系统、调度自动化、配电自动化, liudong@ieee.org;

余南华(1976), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为智能配电网及配电自动化, ynhzy2@163.com。

(责任编辑 张玉荣)