第48卷 第21期 2024年11月10日
DOI：10.7500/AEPS20240327004
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol. 48 No. 21 Nov. 10，2024

基于智能配电变压器的格状化配电系统及其协调控制

李星彤[1]，裴忠晨[1]，刘　聪[2]，刘　闯[1]，朱　帝[1]，王菁月[1]
（1. 东北电力大学电气工程学院，吉林省吉林市 132012；
2. 国网吉林省电力有限公司四平供电公司，吉林省四平市 136099）

摘要：大量分布式光伏电源的接入为配电系统的安全、经济运行带来了巨大挑战。针对配电系统线路损耗和电能质量问题，提出一种基于智能配电变压器的格状化配电系统架构。综合配电系统源-荷之间的功率关系与电能质量综合治理，构建格状化配电系统协调控制策略。最后，在MATLAB/Simulink中建立双节点系统模型进行仿真验证。仿真结果表明，所提格状化配电系统架构相较于其他传统架构降低了系统功率损耗、实现了电能质量治理功能。

关键词：配电网；交直流配电系统；分布式电源；智能配电变压器；功率流优化

0　引言

随着中国“碳达峰·碳中和”目标的不断贯彻落实，国家能源局提出了整县光伏推进计划，越来越多的分布式电源（distributed generator，DG）被接入配电网中。然而，大量DG接入也带来了谐波污染、电压波动、双向潮流和直流注入等问题[1-4]，为传统配电系统安全、稳定、高效运行带来了巨大的挑战[5-6]。如何在传统三相交流技术的基础上，变换电能形式、提升电能输送能力、降低配电系统功率损耗，实现配电系统安全高效的运行成为配电领域重要的课题[7]。

DG经互联变流器（interlink converter，IC）直接接入配电系统交流线路的技术较为成熟，是系统协调控制策略最简易的DG常规交流汇集方式[8]。但存在DG功率以交流形式向其附近负荷节点的转供过程功率损耗较高、谐波注入量大等电能质量问题[9-10]。

文献[11]将基于级联H桥的多端口电力电子变压器（power electronic transformer，PET）作为枢纽设备引入配电系统，构建具有电能质量综合治理能力的交直流配电系统，但PET仍然存在体积大、成本高、可靠性低的问题[12-13]。文献[14]提出采用部分功率变换思想、深度融合工频变压器技术与电力电子技术的智能配电变压器（smart distribution transformer，SDT）拓扑，提供直流形式电能接口，既实现了配电系统功率柔性调控、电能质量综合治理，又具有成本低、可靠性高的优势。目前，将SDT作为枢纽设备引入是构建安全可控、灵活高效的新型交直流配电系统的重要发展方向。

由于SDT提供了直流接口，DG可以选择以低压直流（low voltage DC，LVDC）的形式汇集[15]。其优点为直流子网线路损耗低，但存在负荷节点与DG分布特性不匹配、供电等效路径长的问题。因此，还需要对配电系统中的DG汇集形式进行优化，以改善交直流配电系统线路损耗问题[16]。

随着新型直流源荷的不断接入，配电系统将在交流形式的基础上不断提高柔性直流形式的比例，形成交直流混合共存的配电系统[17]。针对降低交直流配电系统末端户用光伏的场景，以优化系统总功率损耗、改善电能质量、优化系统运行稳定性为目的，本文提出了一种基于SDT的交直流配电系统架构及其协调控制策略。在MATLAB/Simulink中建立双负荷节点的系统仿真模型，并在多模式运行状态下与其他配电系统架构进行对比验证，证明了格状化配电系统综合运行状态更优。

1　配电系统架构

1.1　常规配电系统架构

在常规交流汇集系统中，0.4 kV配电系统通过变压器连接到10 kV电网，0.4 kV配电系统中的DG经由各节点的IC向其所连的负荷节点供电。

附录A图A1（a）为n节点常规交流汇集系统。图A1（b）为n节点常规直流汇集系统。系统中各IC以低压交流（low voltage AC，LVAC）的形式向

收稿日期：2024-03-27；修回日期：2024-05-03。
上网日期：2024-08-12。
国家电网公司科技项目（SGJLSP00XTJS2301441）。

负荷供电。其中，0.4 kV配电系统通过变压器连接到10 kV电网，各DG经由直流汇集母线以LVDC的形式集中汇集到变压器出口节点，并通过集中式DC/AC逆变器转化为LVAC向负荷节点供电。

附录A图A1(c)为n节点常规两端柔性互联系统，该系统为DG在配电系统两端进行直流汇集的改进常规直流汇集系统。在常规两端柔性互联系统中，0.4 kV配电系统两端通过变压器连接到10 kV电网，各DG经由直流汇集母线以LVDC的形式集中汇集到配电系统两端变压器低压侧出口节点，并通过集中式DC/AC逆变器转化为LVAC向交流负荷供能。

1.2　格状化配电系统架构

在格状化配电系统中，0.4 kV配电系统通过SDT连接到10 kV电网，直流汇集母线接入SDT中由前级变换器(front electronic converter，FEC)和后级变换器(back electronic converter，BEC)之间引出的直流端口，系统中各设备辅以适当的协调控制策略，构成基于SDT的格状化配电系统。格状化配电系统架构如图1所示。

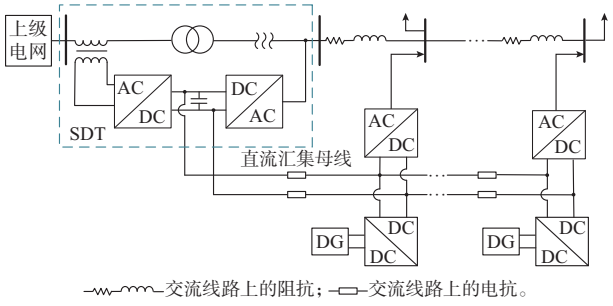

图1　格状化配电系统结构图

Fig. 1　Architecture of meshed distribution system

本文所提格状化配电系统架构中的DG只提供有功功率，系统所需的无功功率均通过SDT由10 kV电网注入；直流汇集母线电压由SDT的BEC调节，不需要各节点DC/DC变换器来维持。同时，SDT为格状化配电系统提供三相四线制LVAC端口，在DG发电功率不足时，为整个配电系统进行功率、电压支撑；在DG发电功率充足时，为整个配电系统进行无功功率支撑。

2　格状化配电系统协调控制策略

2.1　系统级控制策略

首先，格状化配电系统协调控制策略应保证满足交流负荷的正常运行；其次，应考虑直流子网的稳定性；最后，通过中央控制器的算法来完成各节点DG之间LVDC形式的电能分配。

考虑配电系统中各DG出力的波动和各节点负荷需求波动之间的矛盾[17]，系统通过协调各个节点负荷和DG功率情况，设定两种运行模式，实现系统DG功率的最大化消纳，并将系统整体功率损耗降到最低，提出一种格状化配电系统总体功率控制策略。

格状化配电系统分为两种工作模式。其中，工作模式1对应配电系统中总负荷需求量大于配电系统DG总功率，配电系统负荷的功率缺额经由SDT从10 kV电网获取，并以LVAC形式向各负荷节点提供；在工作模式2中，配电系统中总负荷小于或等于配电系统中DG总功率，配电系统中额外的总有功功率经由直流汇集母线以LVDC形式向10 kV电网或其他配电系统反送。

各个工作模式下，SDT对应的有功功率P_{SDT}如式(1)所示。

$$P_{\mathrm{SDT}}=\begin{cases}\sum_{i=1}^{n}(P_{\mathrm{load},i}-P_{\mathrm{pv},i}) & \text{工作模式1}\\ -\sum_{i=1}^{n}(P_{\mathrm{pv},i}-P_{\mathrm{load},i}) & \text{工作模式2}\end{cases}\tag{1}$$

式中：n为节点总数；$P_{\mathrm{load},i}$为第i个节点的有功功率负荷；$P_{\mathrm{pv},i}$为第i个节点的光伏出力。

系统各个工作模式下对应的有功功率盈余节点的IC有功功率参考值按其所连节点负荷设置，具体参考值计算方法如式(2)所示。

$$P^{*}_{\mathrm{con\_sp},i}=P_{\mathrm{load\_sp},i}\tag{2}$$

式中：$P^{*}_{\mathrm{con_sp},i}$为第$i$个功率盈余节点的IC变流器有功功率参考值；$P_{\mathrm{load_sp},i}$为第$i$个功率盈余节点的有功功率负荷。

格状化配电系统协调控制策略如图2所示。图中：v_{grid}为10 kV电网的电压；v_{FEC}为FEC出口处的电压；i_{FEC}为FEC出口处的电流；i_0为0.4 kV中性线的电流；$i_{0,\mathrm{ref}}$为中性线的电流参考值；v_{load}为0.4 kV电网的电压；i_{load}为0.4 kV电网的电流；v_{dc}为直流汇集母线电压；$v_{\mathrm{dc,ref}}$为直流汇集母线电压的参考值；$P_{\mathrm{con,ref},i}$为第i个节点IC的有功功率参考值。

系统按工作模式1运行时，系统DG总功率不足，系统功率缺额节点IC参考值为自身所在节点DG功率与其余所有功率盈余节点除自身负荷外的总盈余功率按功率缺额节点数量之和平均分配。系统按工作模式2运行时，系统DG总功率有盈余，系统功率缺额节点IC参考值按自身负荷功率设置即可。系统各个模式下，各节点IC有功功率参考值设置如式(3)所示。

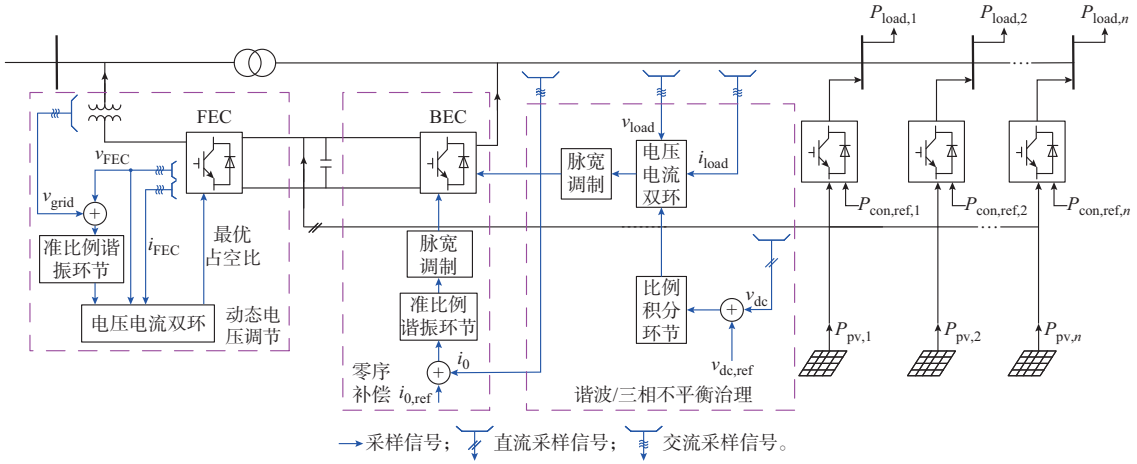

图2　格状化配电系统协调控制策略图

Fig. 2　Coordinated control strategy of meshed distribution system

$$P^{*}_{con\_st,i}=\begin{cases}P_{pv\_st,i}+\dfrac{P_{load\_st,i}}{\sum_{i=1}^{n}P_{load\_st,i}}\cdot\\ \qquad\sum_{i=1}^{n}(P_{pv\_sp,i}-P_{load\_sp,i}) & \text{工作模式1}\\ P_{load,i} & \text{工作模式2}\end{cases}\tag{3}$$

式中：$P^{*}_{con_st,i}$为第i个功率缺额节点的IC有功功率参考值；$P_{pv_st,i}$为第i个功率缺额DG节点发出的有功功率；$P_{load_st,i}$为第i个功率缺额节点的有功功率负荷；$P_{pv_sp,i}$为第i个功率盈余DG节点的有功功率。

格状化配电系统功率管理流程图如图3所示。图中：$\sum P_{load}$为系统中全部负荷的有功功率；$\sum P_{pv}$为系统中全部DG的有功功率；$P_{st,i}$为第i个节点的功率缺额。

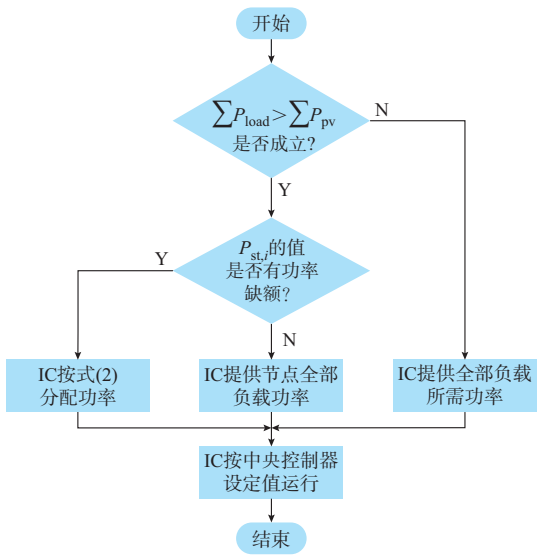

图3　格状化配电系统功率管理流程图

Fig. 3　Flow chart of power management of meshed distribution system

2.2　SDT电力电子部分容量设计

2.2.1　FEC容量设计

在格状化配电系统架构中，FEC经一个三相变压器串联接入工频主变压器10 kV侧，用于补偿配电系统内电压波动。根据10 kV及以下三相供电电压允许偏差为标称系统电压的±10%与SDT在10 kV侧进行电压波动补偿的特点[18-19]，当配电系统中按某一功率因数稳定运行时，10 kV侧电压电流均稳定，当系统电压发生突变时，可认为高压侧电流不变，而跌落的电压由FEC进行补偿。因此，考虑裕度的FEC的容量S_{FEC}为：

$$S_{FEC}=|\Delta\dot{U}_n|\frac{S_{load,n}}{|\dot{U}_n|}(1+\mu_{FEC})\tag{4}$$

式中：$S_{load,n}$为系统额定运行时的容量；$\Delta\dot{U}_n$为SDT出口处对应电压等级下的电压相量波动标准；$\dot{U}_n$为系统SDT出口处额定电压相量；μ_{FEC}为系统预设的FEC裕度。

2.2.2　BEC容量设计

在格状化配电系统架构中，SDT的BEC经L型滤波器按三相四线制接入工频主变压器的0.4 kV侧。其主要功能为：提供直流-交流功率双向变换通道、维持直流汇集母线电压、谐波治理、三相不平衡治理。因此，SDT的BEC容量设计应分如下几种情况讨论。

1）当配电系统所有DG优先全部消纳时，应综合考虑电压总谐波畸变率、系统三相不平衡度、配电系统部分DG容量上网3个因素[20-21]。

其中，对于0.4 kV低压配电系统，要求系统总

电压谐波含有量$U_{THD}\leqslant 5\%$，则SDT的BEC谐波治理容量S_H为：

$$S_H=5\%\dot{U}_n\dot{I}_n(1+\mu_H) \tag{5}$$

式中：$\dot{I}_n$为系统额定运行时的电流相量；μ_H为系统谐波治理容量裕度。

在0.4 kV低压配电系统中，要求负序电压三相不平衡度$\varepsilon_{U2}\leqslant 2\%$，则SDT的BEC进行三相不平衡治理的容量$S_{ub}$为：

$$S_{ub}=\dot{I}_n\frac{\dot{U}_{tran\_2}}{\varepsilon_{U2}}(1+\mu_{ub}) \tag{6}$$

式中：$\dot{U}_{tran_2}$为系统SDT出口处的实际负序电压相量；μ_{ub}为BEC三相不平衡治理容量裕度。

考虑裕度的SDT后级变压器容量S_{BEC}的目标函数为：

$$\min S_{BEC}=\mu\sum P_{pv}+\max\{S_{ub},S_H\} \tag{7}$$

式中：μ为格状化配电系统预设最大DG功率反送比例。

其所应满足的约束条件为：

$$\begin{cases}U_{THD}\leqslant 5\%\\ \varepsilon_{U2}\leqslant 2\%\\ P_{re}\leqslant\mu\sum P_{pv}\end{cases} \tag{8}$$

式中：P_{re}为格状化配电系统经直流汇集母线反送的功率。

不同配电系统中SDT的BEC容量可根据式(7)实际计算。

2)当配电系统中所有DG不向负荷节点供电、全部反送时，反向负载率λ应小于等于80%[22]。反向负载率λ计算公式为：

$$\lambda=\frac{P_D-P_L}{S_B}\times 100\% \tag{9}$$

式中：P_D为DG总有功功率；P_L为系统的有功功率负荷；S_B为变压器或线路的额定运行限值。

此时，BEC为全功率变换，其容量应按配电系统额定容量的80%设计。但此种容量设计与本文格状化配电系统户用光伏的应用场景相悖，此处不再赘述。

2.3　设备级控制策略

目前，配电系统中的DC/AC变流器控制方式有：并网状态下的有功功率-无功功率(P-Q)控制、下垂控制和孤岛状态下的电压/频率(V/f)控制[23-24]。当IC采用并网状态下的P-Q控制策略时，控制较为简单，但是控制过程中需要引入通信手段；当IC采用下垂控制策略时，系统可实现基于下垂系统的系统负荷自分配，但仍然存在一些电能质量方面的问题。这两种控制方式各有优缺点，本文提出的格状化配电系统架构中，设备的控制策略将会以带有通信功能P-Q控制策略的IC为例。考虑“户用光伏”的特点，系统IC的有功功率参考值由中央控制器采集各节点DG出力与各节点负荷综合计算得出，并通过通信功能向各节点IC发送参考值，以优化配电系统DG的消纳能力，预设各节点IC控制无功功率参考值为0。

3　系统损耗对比

常规直流汇集系统的有功功率流如图4所示。图中：P_{ij}和Q_{ij}分别为第i个节点流向第j个节点的有功功率和无功功率；$P_{D,i}$和$Q_{D,i}$分别为第i个节点流出的有功功率和无功功率。系统中各DG的功率之和需要经直流汇集母线、各节点IC、配电系统交流母线才能向负荷节点供电。常规直流汇集系统在维持配电系统运行时的有功功率损耗高于其余两种配电系统架构。因此，本文不对常规直流汇集系统的有功功率损耗进行计算与仿真分析[25-28]。

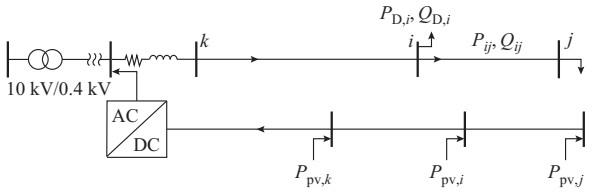

图4　常规直流汇集系统的有功功率流
Fig. 4　Active power flow of conventional DC collection system

针对两端柔性互联网络，因其结构可对负荷从两个方向分别供电，针对不同的控制策略有不同的功率流通路径，故本文以两端电源功率相同、DG向两端平均供电场景为例进行对比分析。

系统中各个节点IC采用电压源变换器(voltage source converter，VSC)的控制形式，系统中DG接入的节点可视作配电网提供有功功率且电流恒定的节点。可以通过式(10)求出该节点的无功功率，并将这类节点转化为传统PQ节点进行计算。

$$\begin{cases}Q_i=\sqrt{|\dot{I}_i|^2|\dot{U}_i|^2-P_i^2}\\ \dot{I}_{pv,i}=\dfrac{P_{pv,i}+\mathrm{j}Q_{pv,i}}{\dot{U}_i}\end{cases} \tag{10}$$

式中：Q_i为第i个节点DG提供的无功功率；$\dot{I}_i$为第i个节点流出的电流相量；$\dot{U}_i$为第i个节点的电压相量；P_i为第i个节点DG提供的有功功率；$\dot{I}_{pv,i}$为第i个节点DG的电流相量；$P_{pv,i}$和$Q_{pv,i}$分别为第i个节点PV的有功功率和无功功率。

本文所采用链式配电系统线路上的功率如式(11)和式(12)所示，其中，负荷电压和阻抗特性可以看做恒定值。

$$\begin{cases} P_i = P_{ij} + \sum_{j\in C_i} P_{ij} + P_{\mathrm{L},ij} \\ Q_i = Q_{ij} + \sum_{j\in C_i} Q_{ij} + Q_{\mathrm{L},ij} \end{cases} \tag{11}$$

$$\begin{cases} P_{\mathrm{L},ij} = \dfrac{r_{ij}}{|\dot{U}_i|^2}\left[\left(\sum_{j\in C_i} P_{ij} + P_{\mathrm{D},i}\right)^2 + \left(\sum_{j\in C_i} Q_{ij} + Q_{\mathrm{D},i}\right)^2\right] \\ Q_{\mathrm{L},ij} = \dfrac{x_{ij}}{|\dot{U}_i|^2}\left[\left(\sum_{j\in C_i} P_{ij} + P_{\mathrm{D},i}\right)^2 + \left(\sum_{j\in C_i} Q_{ij} + Q_{\mathrm{D},i}\right)^2\right] \end{cases} \tag{12}$$

式中：$P_{\mathrm{L},ij}$和$Q_{\mathrm{L},ij}$分别为支路ij的有功功率损耗和无功功率损耗；r_{ij}和x_{ij}分别为支路ij的电阻和电抗；C_i为第i个节点所有馈线支路的集合。

第i个节点的电压相量为：

$$\dot{U}_i = \dot{U}_{i-1} - \dot{I}_{i-1}(r_{i-1,i} + \mathrm{j}x_{i-1,i}) \tag{13}$$

式中：$r_{i-1,i}$为第$i-1$个节点到第i个节点的电阻；$x_{i-1,i}$为第$i-1$个节点到第i个节点的电抗。

$\dot{I}_i$的表达式为：

$$\dot{I}_i = \frac{P_{i+1} - \mathrm{j}Q_{i+1}}{\dot{U}^*_{i+1}} \tag{14}$$

式中：$\dot{U}^*_{i+1}$为第$i+1$个节点电压相量的共轭。

节点IC的有功功率损耗为：

$$P_{\mathrm{conloss},i} = P_{\mathrm{load},i}(1 - \eta_{\mathrm{IC},i}) \tag{15}$$

式中：$P_{\mathrm{conloss},i}$为系统第i个节点IC的有功功率损耗；$\eta_{\mathrm{IC},i}$为第i个节点IC的变换效率。

规定配电系统中变压器0.4 kV出口节点为第1个节点。

1)首先，对n节点常规交流汇集系统以工作模式2运行的各个节点有功功率损耗进行计算。

在交流汇集形式中，第i个节点流出电流相量为：

$$\dot{I}_i = \frac{P_{\mathrm{load},i} - P_{\mathrm{pv},i} - \mathrm{j}Q_{\mathrm{load},i}}{\dot{U}^*_{\mathrm{N},i}} \tag{16}$$

式中：$Q_{\mathrm{load},i}$为第i个节点流出的无功功率；$\dot{U}^*_{\mathrm{N},i}$为第i个节点的平均额定电压相量的共轭。

根据式(16)中系统各节点流出电流并计及节点无功功率负荷进行计算。

$$P_{\mathrm{acloss},i} = \left[|\dot{I}_i|^2 + \frac{(Q_i - Q_{\mathrm{pv},i})^2}{|\dot{U}_{\mathrm{N},i}|^2}\right] R_{\mathrm{ac},i,i+1} \tag{17}$$

式中：$P_{\mathrm{acloss},i}$为系统第i个节点交流部分有功功率的损耗；$\dot{U}_{\mathrm{N},i}$为第i个节点IC的平均额定电压相量；$R_{\mathrm{ac},i,i+1}$为交流线路上第i个节点和第$i+1$个节点之间的线路电阻。

将式(16)得到的系统各个节点IC损耗与式(17)得到的系统各节点损耗相加，则n节点常规交流汇集系统的总有功功率损耗P_{loss}为：

$$P_{\mathrm{loss}} = \sum_{i=1}^{n}(P_{\mathrm{acloss},i} + P_{\mathrm{conloss},i}) \tag{18}$$

2)n节点两端柔性互联网络以工作模式2运行时的直流子网各个节点的有功功率损耗为：

$$P_{\mathrm{dcloss},i} = \left(\frac{P_{\mathrm{pv},i} - P_{\mathrm{load},i} - P_{\mathrm{conloss},i}}{2U_{\mathrm{dcline}}}\right)^2 R_{\mathrm{dc},i,i+1} \tag{19}$$

式中：$P_{\mathrm{dcloss},i}$为系统第i个节点直流部分有功功率损耗；U_{dcline}为直流汇集母线的额定电压；$R_{\mathrm{dc},i,i+1}$为直流线路上第i个节点和第$i+1$个节点之间的线路电阻。

n节点两端柔性互联网络以工作模式2运行时，0.4 kV电网中各节点的有功功率损耗为：

$$P_{\mathrm{acloss},i} = \left[\left(\frac{|\dot{I}_i|}{2}\right)^2 + \frac{\left(\dfrac{Q_i - Q_{\mathrm{pv},i}}{2}\right)^2}{|\dot{U}_{\mathrm{N},i}|^2}\right] R_{\mathrm{ac},i,i+1} \tag{20}$$

综合式(16)、式(19)、式(20)，n节点两端柔性互联系统总有功功率损耗P_{loss}为：

$$P_{\mathrm{loss}} = \sum_{i=1}^{n} P_{\mathrm{dcloss},i} + \sum_{i=1}^{n} P_{\mathrm{acloss},i} + \sum_{i=1}^{n} P_{\mathrm{conloss},i} \tag{21}$$

3)n节点格状化配电系统以工作模式2运行时，直流子网各个节点的有功功率损耗为：

$$P_{\mathrm{dcloss},i} = \left(\frac{P_{\mathrm{pv},i} - P_{\mathrm{load},i} - P_{\mathrm{conloss},i}}{U_{\mathrm{dcline}}}\right)^2 R_{\mathrm{dc},i,i+1} \tag{22}$$

n节点格状化配电系统以工作模式2运行时，0.4 kV电网各个节点的有功功率损耗如式(17)所示。

最后，根据式(21)对n节点格状化配电系统直流子网各节点、0.4 kV电网各节点、各节点IC有功功率损耗求和，所得到的结果即为n节点格状化配电系统总有功功率损耗。

当$\sum_{i=1}^{n} P_{\mathrm{pv},i} - P_{\mathrm{loss}} < \sum_{i=1}^{n} P_{\mathrm{load},i}$时，系统工作在工作模式1。此时，0.4 kV电网需要为系统中的负荷提供功率支撑，常规交流汇集系统总有功功率损耗需计及各节点IC变换器的损耗与0.4 kV电网损耗；在此基础上，格状化配电系统还需计及系统内部直流子网的损耗；两端柔性互联网络还需基于不同的两端供电策略，从各节点向两侧电源分别计算。

当$\sum_{i=1}^{n}P_{\mathrm{pv},i}-P_{\mathrm{loss}}\geqslant\sum_{i=1}^{n}P_{\mathrm{load},i}$时，系统工作在工作模式2。系统内总DG功率已满足全部负荷的功率需求，多余DG功率将会反送回10 kV电网。此时，常规交流汇集系统总有功功率损耗需计及配电系统中各节点IC变换器的损耗，从线路末端节点向变压器出口节点进行计算；在此基础上，格状化配电系统还需计及系统内部直流子网的损耗；两端柔性互联网络还需基于不同的DG功率流控制策略，从各节点向两侧电源分别计算。

以单负荷节点系统为例，计算4种系统在不同工作模式下的总有功功率损耗。系统参数为：单节点系统总负荷$S_{\mathrm{load}}=(200+\mathrm{j}180)\mathrm{kV}\cdot\mathrm{A}$；$R_{\mathrm{ac}}=R_{\mathrm{dc}}=0.216\ \Omega$，其中，$R_{\mathrm{ac}}$和$R_{\mathrm{dc}}$分别为单节点系统交流部分的总电阻和直流部分的总电阻；单节点系统交流部分总电抗$X_{\mathrm{ac}}=0.021\,6\ \Omega$；IC的变换效率$\eta_{\mathrm{IC}}=97\%$。由附录A图A2可知，系统运行于工作模式1时，常规交流汇集系统和格状化配电系统总有功损耗相同并低于常规直流汇集系统。此时，常规两端柔性互联系统负荷两侧均有电源，每条线路承担的功率较小，故线损较低；当系统运行于工作模式2时，格状化配电系统的总有功损耗在4种系统中最低。

结合系统工作模式，格状化配电系统光伏功率消纳过程中的损耗在4种系统架构中综合最优。

4　仿真分析

为验证本文所述系统架构的正确性和有效性，在MATLAB/Simulink软件中搭建了一个基于SDT的格状化配电系统。该系统含有两个负荷节点，分别接与总线1与总线2上；IC从两个DG获取功率。本章共设置了5个场景的系统仿真。系统仿真的详细信息见附录A表A1。

场景1为DG非一致性出力突增。系统具体情况如下：开始时，总线1接入10 kW负荷，总线2接入6 kW负荷；在0.3 s前，第1个节点的光伏出力为10 kW、第2个节点的光伏出力为6 kW；在0.3 s后，第1个节点的光伏出力为15 kW，第2个节点的光伏出力为9 kW。此时，系统运行于工作模式2。此外，两端柔性互联网络中，两个光伏节点直接通过各自IC向两个电源全功率供电。

场景2为非一致性负荷突增。开始时，总线1接入10 kW负荷，总线2接入6 kW负荷；在0.3 s后，接入4 kW负荷；在0.3 s前，第1个和第2个节点的光伏出力均为5 kW；在0.3 s后，第1个节点的光伏出力为10 kW，第2个节点的光伏出力为6 kW。此时，格状化配电系统从工作模式2切换为工作模式1。此外，在两端柔性互联网络中，两个光伏节点直接通过各自IC向两个电源全功率供电。

场景3为系统谐波治理，系统未接入DG。开始时，总线1接入5 kW非线性负荷，总线2接入5 kW负荷；在0.3 s后，系统开启谐波治理功能。

场景4为系统电压补偿，系统未接入DG。开始时，总线1和总线2均接入了5 kW负荷；在0.3 s后，SDT一次侧电压跌落$10\%\dot{U}_{\mathrm{n}}$。

场景5为系统三相不平衡治理，系统未接入DG。开始时，总线1的A、B、C相分别接入25、30、35 Ω的电阻；在0.3 s后，SDT开启三相不平衡治理功能。

各场景系统状态图如附录A图A3—图A9所示。场景1仿真结果如图A3所示，双节点格状化配电系统架构在DG非一致性出力时，相较于双节点交流汇集系统，损耗减少约70 W，比传统交流汇集系统减少约8.75%，且两者损耗情况均优于两端柔性互联系统。当DG功率不平衡程度加大时，格状化配电系统损耗将会更优。由图A4可知，在场景1的运行条件下，格状化配电系统损耗优势主要体现在DG盈余功率以直流形式反送，无须经过各节点IC，等效供电路径较短。

场景2仿真结果如附录A图A5所示。格状化配电系统在DG功率双节点系统负荷、DG功率非一致性突增前，二者系统功率损耗一致；当系统突变后，相较于交流汇集系统，格状化配电系统的损耗减少约5.6 W，比传统交流汇集系统减少约1.05%，且两者损耗情况均优于两端柔性互联系统。当DG、系统负荷不平衡加剧时，格状化配电系统比交流汇集系统的损耗更低。由图A6可以看出，在场景2的运行条件下，格状化配电系统优势为功率盈余节点的DG功率以直流形式向功率缺额节点转供损耗小。

综合场景1和场景2可知，格状化配电系统相较于其他两个常规系统更优。

场景3的仿真结果如附录A图A7所示，在0.3 s后，系统开启谐波治理功能，系统三相电流波形得到了明显改善。由图A7(a)可知，格状化配电系统架构可以治理配电系统谐波污染。

场景4的仿真结果如附录A图A8所示，在0.3 s后，系统启动电压补偿功能。由图A8(a)可知，在0.3 s，系统启动电压补偿功能后，对系统10 kV侧跌落的$10\%\dot{U}_{\mathrm{n}}$完成补偿，说明格状化配电系统可以治理配电系统电压波动。

场景5的仿真结果如附录A图A9所示,可以验证系统完成了三相不平衡治理。由图A9(e)可知,SDT可向0.4 kV配电系统的逆变器提供正确的电压幅值及相位参考,提高了系统的可靠性。

综合各场景仿真结果可得出本文所提格状化配电系统为综合最优。

5 结语

本文通过对比常规交流汇集形式的系统、常规直流汇集形式的系统、常规两端柔性互联系统和格状化的配电系统,得出以下两个结论:

1)格状化配电系统因DG分布特性与负荷节点分布特性相同,无论配电系统光照情况是否充足,可综合配电系统总负荷与DG总出力确定系统工作模式,相较于其他3种传统形式下的配电系统,本文所提格状化配电系统架构在系统运行时的有功功率损耗最低。

2)格状化配电系统架构具有补偿系统谐波与电压波动的功能,可多路径对负荷节点供电,故格状化配电系统的电能质量相较于其他3种常规系统架构更优。

后续将在本文基础上,从系统DG功率盈余节点向DG功率缺额节点进行最优功率分配的算法、各节点IC功率因数最优化设置等方面进行研究。

附录见本刊网络版(http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

[1] 丁明,王伟胜,王秀丽,等.大规模光伏发电对电力系统影响综述[J].中国电机工程学报,2014,34(1):1-14.
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.

[2] 王子辉,贾燕冰,李彦晨,等.计及电能质量影响的主动配电网光储容量优化[J].电网技术,2024,48(2):607-617.
WANG Zihui, JIA Yanbing, LI Yanchen, et al. Optimal capacity configuration of photovoltaic and energy storage system in active distribution network considering influence of power quality[J]. Power System Technology, 2024, 48(2): 607-617.

[3] 王强钢,周亦尧,廖建权,等.直流配电网电能质量研究综述[J].电力系统自动化,2023,47(7):193-207.
WANG Qianggang, ZHOU Yiyao, LIAO Jianquan, et al. Review on power quality in DC distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(7): 193-207.

[4] KAWABE K, TANAKA K. Impact of dynamic behavior of photovoltaic power generation systems on short-term voltage stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3416-3424.

[5] 张东霞,姚良忠,马文媛.中外智能电网发展战略[J].中国电机工程学报,2013,33(31):1-14.
ZHANG Dongxia, YAO Liangzhong, MA Wenyuan. Development strategies of smart grid in China and abroad[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 1-14.

[6] 姜云鹏,任洲洋,李秋燕,等.考虑多灵活性资源协调调度的配电网新能源消纳策略[J].电工技术学报,2022,37(7):1820-1835.
JIANG Yunpeng, REN Zhouyang, LI Qiuyan, et al. An accommodation strategy for renewable energy in distribution network considering coordinated dispatching of multi-flexible resources [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(7): 1820-1835.

[7] 张世旭,李姚旺,刘伟生,等.面向微电网群的云储能经济-低碳-可靠多目标优化配置方法[J].电力系统自动化,2024,48(1):21-30.
ZHANG Shixu, LI Yaowang, LIU Weisheng, et al. Economic, low-carbon and reliable multi-objective optimal configuration method of cloud energy storage for microgrid clusters [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(1): 21-30.

[8] 张释中,裴玮,杨艳红,等.交直流混合配电网结构优选和设备容量优化[J].中国电机工程学报,2020,40(9):2766-2776.
ZHANG Shizhong, PEI Wei, YANG Yanhong, et al. Optimization of AC/DC hybrid distribution network structure and equipment capacity[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2766-2776.

[9] 林丽娟,贾清泉,田书娅,等.基于一致性算法的配电网谐波分布式治理策略[J].电力系统自动化,2022,46(2):109-117.
LIN Lijuan, JIA Qingquan, TIAN Shuya, et al. Distributed harmonic mitigation strategy of distribution network based on consensus algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(2): 109-117.

[10] 张震霄,年珩,李培,等.储能型统一电能质量调节器电压补偿能力分析及提升方法[J].电力系统自动化,2022,46(23):151-159.
ZHANG Zhenxiao, NIAN Heng, LI Pei, et al. Voltage compensation capability analysis and improvement method for unified power quality conditioner with energy storage [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(23): 151-159.

[11] 袁立强,高深,姬世奇,等.基于占空比同步的电力电子变压器低压交流端口模式切换控制[J].电工技术学报,2022,37(3):729-738.
YUAN Liqiang, GAO Shen, JI Shiqi, et al. Mode transition for low voltage AC port of power electronic transformers based on duty cycle synchronization [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(3): 729-738.

[12] 李凯,赵争鸣,袁立强,等.面向交直流混合配电系统的多端口电力电子变压器研究综述[J].高电压技术,2021,47(4):1233-1250.
LI Kai, ZHAO Zhengming, YUAN Liqiang, et al. Overview on research of multi-port power electronic transformer oriented for AC/DC hybrid distribution grid [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1233-1250.

[13] 马文忠，郤宇阳，王玉生，等.面向新能源接入的电能路由器模式切换协调控制策略[J].电力系统保护与控制，2023，51(18)：52-61.
MA Wenzhong，TAI Yuyang，WANG Yusheng，et al. Mode switching coordination control strategy of an electrical energy router for new energy access[J]. Power System Protection and Control，2023，51(18)：52-61.

[14] LIU Y B，LIANG D L，KOU P，et al. Compound control system of hybrid distribution transformer [J]. IEEE Transactions on Industry Applications，2020，56(6)：6360-6373.

[15] 王强强，姚良忠，盛万兴，等.基于机会约束规划的配电网分布式光伏承载力提升方法[J].电力系统自动化，2023，47(18)：132-141.
WANG Qiangqiang，YAO Liangzhong，SHENG Wanxing，et al. Enhancement method for distributed photovoltaic hosting capacity of distribution network based on chance-constrained programming [J]. Automation of Electric Power Systems，2023，47(18)：132-141.

[16] 郭祺，贾文慧，涂春鸣，等.面向暂态电压主动支撑的多功能并网变流器多模式柔性切换策略[J].电力系统自动化，2023，47(21)：156-164.
GUO Qi，JIA Wenhui，TU Chunming，et al. Multi-mode flexible switching strategy of multi-functional grid-connected converters for active support to transient voltage [J]. Automation of Electric Power Systems，2023，47(21)：156-164.

[17] 唐巍，张起铭，张璐，等.新型配电系统多层级交直流互联理念、关键技术与发展方向[J].电力系统自动化，2023，47(6)：2-17.
TANG Wei，ZHANG Qiming，ZHANG Lu，et al. Concept，key technologies and development direction of multilevel AC/DC interconnection in new distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems，2023，47(6)：2-17.

[18] 国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会.电能质量 供电电压偏差：GB/T 12325—2008[S].北京：中国标准出版社，2009.
General Administration of Quality Supervision，Inspection and Quarantine of the People's Republic of China，Standardization Administration of the People's Republic of China. Power quality-deviation of supply voltage：GB/T 12325—2008 [S]. Beijing：Standards Press of China，2009.

[19] HIROFUMI A. Instantaneous power theory and applications to power conditioning [M]. Beijing：China Machine Press，2009.

[20] 国家技术监督局.电能质量 公用电网谐波：GB/T 14549—1993[S].北京：中国标准出版社，1994.
State Bureau of Quality and Technical Supervision of the People's Republic of China. Quality of electric energy supply - harmonics in public supply network：GB/T 14549—1993[S]. Beijing：Standards Press of China，1994.

[21] 国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会.电能质量 三相电压不平衡：GB/T 15543—2008[S].北京：中国标准出版社，2009.
General Administration of Quality Supervision，Inspection and Quarantine of the People's Republic of China，Standardization Administration of the People's Republic of China. Power quality-three-phase voltage unbalance：GB/T 15543—2008 [S]. Beijing：Standards Press of China，2009.

[22] 国家能源局.分布式电源接入电网承载力评估导则：DL/T 2041—2019[S].北京：中国电力出版社，2019.
National Energy Administration. Technical guideline for evaluating power grid hosting capacity of distributed resources connected to network：DL/T 2041—2019[S]. Beijing：China Electric Power Press，2019.

[23] 杨义，杨苹，唐玉烽.兼具电能质量补偿功能的互联变换器统一控制策略[J].电力系统自动化，2021，45(15)：132-140.
YANG Yi，YANG Ping，TANG Yufeng. Unified control strategy with power quality compensation function for interlinking converters [J]. Automation of Electric Power Systems，2021，45(15)：132-140.

[24] 杨宇，文福拴，周星龙，等.高光伏渗透率配电系统电压协同控制研究综述[J].电力自动化设备，2023，43(10)：48-58.
YANG Yu，WEN Fushuan，ZHOU Xinglong，et al. Research review of voltage cooperative control in distribution system with high photovoltaic penetration [J]. Electric Power Automation Equipment，2023，43(10)：48-58.

[25] PEYGHAMI S，MOKHTARI H，BLAABJERG F. Autonomous operation of a hybrid AC/DC microgrid with multiple interlinking converters [J]. IEEE Transactions on Smart Grid，2018，9(6)：6480-6488.

[26] SHIN J R，KIM B S，PARK J B，et al. A new optimal routing algorithm for loss minimization and voltage stability improvement in radial power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems，2007，22(2)：648-657.

[27] LAKSHMI S，GANGULY S. An on-line operational optimization approach for open unified power quality conditioner for energy loss minimization of distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2019，34(6)：4784-4795.

[28] 王涛，钟浩，李世春，等.基于主从博弈的多微电网储能容量优化配置[J].智慧电力，2023，51(1)：9-15.
WANG Tao，ZHONG Hao，LI Shichun，et al. Optimal allocation of energy storage capacity in multi-microgrid based on master-slave game[J]. Smart Power，2023，51(1)：9-15.

李星彤(1999—)，男，硕士研究生，主要研究方向：电力电子功率变换技术及其在电力系统中应用研究。E-mail：1262978201@qq.com

裴忠晨(1994—)，男，通信作者，博士研究生，主要研究方向：电力电子功率变换技术及其在电力系统中应用研究。E-mail：neepupeizhongchen@163.com

刘　聪(1987—)，男，高级工程师，主要研究方向：电力系统调控运行、继电保护、配电网控制。E-mail：353474279@qq.com

（编辑　杨松迎）

Meshed AC/DC Distribution System with Smart Distribution Transformers and Its Coordinated Control

LI Xingtong[1], *PEI Zhongchen*[1], *LIU Cong*[2], *LIU Chuang*[1], *ZHU Di*[1], *WANG Jingyue*[1]

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;
2. Siping Power Supply Company of State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd., Jilin 136099, China)

Abstract: The integration of a large number of distributed photovoltaic power sources brings great challenges to the safe and economic operation of the distribution system. Aiming at the problem of line losses and power quality in the distribution system, a meshed distribution system architecture based on smart distribution transformer (SDT) is proposed. The coordinated control strategy for the meshed distribution system is constructed by synthesizing the power relationship between source-load and integrated power quality management in the distribution system. Finally, a two-bus system model is established in MATLAB/Simulink for simulation verification. The simulation results show that the proposed meshed distribution system architecture reduces the loss of system power and realizes the function of power quality management compared with other traditional architectures.

This work is supported by State Grid Corporation of China (No. SGJLSP00XTJS2301441).

Key words: distribution network; AC/DC distribution system; distributed generator (DG); smart distribution transformer (SDT); power flow optimization