

インターネット型直流電力流通システムにおける電力供給経路決定方法

田村 光汰[†] 川喜田 佑介[§] 戸辺 義人[♯] 横川 慎二[‡] 市川 晴久[‡]青山学院大学大学院理工学研究科理工学専攻[†]青山学院大学理工学部情報テクノロジー学科[♯]電気通信大学 i-パワードエネルギー・システム研究センター[‡]神奈川工科大学情報学部情報工学科[§]

1. はじめに

日本のカーボンニュートラル政策においては2030年に温室効果ガス排出量を46%削減するとしており今後再生可能エネルギーは急速に普及していくことが想定される。実現には新たなエネルギープラットフォームの検討が求められる。

本稿では制御単位を従来の電力インフラから大きく小型化し柔軟な構成が可能なインターネット型電力プラットフォームであるバーチャルグリッドシステムの紹介と、当システムにおける電力供給経路決定方法についての設計を行う。

2. 関連研究

小型電力網の例としてマイクログリッドが挙げられる。典型的な特徴としては電力バスにおいて双方向電力フローを実現している、直流配電を行っている、電源をグリッド内に分散配置しているなどが挙げられる¹⁾。

著者らは、従来のマイクログリッドからより制御単位を小型化したUSB Power Deliveryをインタフェースとする再構成可能な超小型グリッドシステムであるバーチャルグリッドについての研究開発を行っている²⁾。本システムにおいては大小様々なデバイスをバーチャルグリッドハブ(VGHub)に接続し、電力需給を行う。従来のインフラベースとは異なるユーザベースのグリッドを構築可能であるという特徴を持つ。

3. 電力合成分配ハブ VGHub

著者らはVGHubのプロトタイプ装置を現在開発中である。プロトタイプ装置はUSB PDに対応したポートを7つ搭載しており、各ポートの電力を流す方向や流す電力の上限値を設定可能なほか、内部のDC-DCコンバータにより供給された電力を内部で合成、あるいは分配することが可能である特徴を持つ。

VGHubは互いに電力を融通可能であり、複数台数接続することで図1のような電力ネットワーク

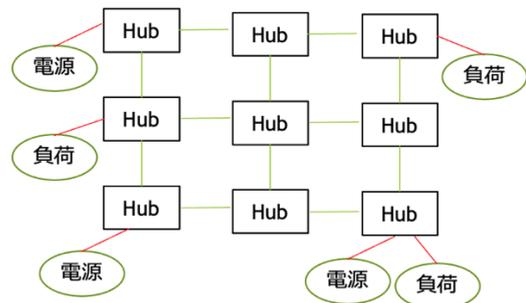


図1 VGHub ネットワーク

を構築することが可能となる。このようなシステムをVGHubネットワークと定義する。本稿ではVGHubネットワークにおける電源の決定手法についての設計と評価を行う。

4. 問題定義と解法

VGHubネットワークを介した電力供給においては中継による電力損失を最小化するために供給ルートを最短化することや供給ルート更新による電力供給中断を減らすことなどが課題である。

問題の解法として、負荷の変化が生じる度にVGHubネットワーク全体に対して最小費用流問題の解として供給ルート更新を行う全体最適化(NWO, Network-wide Optimization)方式に対して、負荷の変化が生じた際に既存の電力供給ルートに影響を与えずに余剰電源からの供給ルート決定を行うMHPPR(Minimum-Hop Power-Path Routing)方式について本稿では設計を行い、説明する。

VGHubが接続されたVGHubネットワークがあるとする。各々のVGHubには、電源や負荷が接続される。あるVGHubに新たに電力を消費する負荷が接続された際の電力供給経路決定問題は以下のように定義することができる。

$$\begin{aligned} \text{解法: } & \min \sum_{p=1}^N \delta_p h_p \\ \text{制約: } & x_p \leq u_p, V \leq \sum_{p=1}^N x_p \end{aligned}$$

以後登場する変数を以下のように定義する.

- V [W]: 新たに負荷が要求する電力
- N : 供給候補となるポート数の上限
- p : ポート番号 (1~ N)
- u_p [W]: n 番目のポートにつながる経路上の VGHub の余剰供給可能電力
- x_p [W]: p 番目のポートから新たに供給する電力
- h_p : p 番目のポートから電力を供給するときの経路のホップ数
- δ_p : p 番目のポートから共有してもらったとき 1, そうでないとき 0

まず, はじめに候補となるポートを u_p の小さい順に並び替える.

$$u_1 \leq u_2 \leq \dots \leq u_{N-1} \leq u_N$$

このとき, V と u_p の関係を基準に以下の 4 通りに場合分けを行う

(1) $0 \leq V \leq u_1$ の場合

このとき候補となるすべてのポートが単独で V を供給可能である. よってホップ数のみを見て選択されるポート $q = \operatorname{argmin}_p h_p$ となる.

(2) $V > \sum_{p=1}^N u_p$ の場合

このとき全ての電力を合計しても V 未満のため, 供給することは物理的に不可能である.

(3) $u_1 < V < u_N$ の場合

このとき $u_j \leq V \leq u_{j+1}$ となる J が必ず存在する. この J を境界数と呼ぶこととする. このとき, $p: J+1 \sim N$ に該当するポートは V を単独で供給可能である. 一方で $p: 1 \sim J$ に該当するポートは複数のポートの電力を合成することで供給可能性がある. ここでは, それぞれの場合でそれぞれ解を出し, 大小を比較する手法を用いる.

$p: J+1 \sim N$ に該当する全てのポートは単独で V が供給可能である. このときは単にホップ数 h_p が最小となるポートを選択すればよく, 候補 $H_2 = \operatorname{argmin}_p h_p$ とする.

一方で $p: 1 \sim J$ の場合は, 2 つ以上のポートの組み合わせを探索によって発見する. そのときの探索アルゴリズムを以下に記述する.

```
begin
  for r: 2 to J
     $\sum_j C_r$  の組み合わせすべてについて  $\sum u_k \geq V$  となる  $p$  の組み合わせを調べる
```

if そのような組み合わせが存在する

```
  return q
end
end
end
```

ただし, 各変数の定義は,

r : 組み合わせ数 (2~ J)

q : $\sum h_k$ が最小となるポートの組み合わせの集合 (初期値 ϕ)

とする. このようにして q の集合 p_1, p_2, \dots, p_r を求め, $H_1 = h(p_1) + h(p_2) + \dots + h(p_r)$ とする.

最後に H_1 と H_2 を比較し, 小さい方のポートが最終的に解として選択される.

(4) $u_N \leq V \leq \sum_{p=1}^N u_p$ の場合

これは, (3) において $J = N$ のときに相当する.

5. 評価

NWO 方式では, ネットワーク全体で最適化するため, VGHub での中継による損失が MHPPR 方式よりも小さくなるが, 電力供給ルートを再設定する頻度が高まる. 一方, MHPPR 方式では, 全体最適化を行わないため, 中継損失は NWO 方式よりも増えるが, 電力負荷変化系列に対して, 過去に設定した電力供給ルートを再設定する頻度は小さくなる.

6. むすび

本稿では VGHub を実世界で展開する上で生じる電力供給問題についての解法設計を行った. 今後は本手法のプロトタイプ装置での実装などを行い, 現実世界での実現性の検討を行いたい.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 20K20314 の助成を受けたものです.

参考文献

1) X. Lu, K. Sun, Josep. M. G, et. al.: "State-of-Charge Balance Using Adaptive Droop Control for Distributed Energy Storage Systems in DC Microgrid Applications", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.61, No.6, pp.2804-2815 (2014).

2) H. Ichikawa, S. Yokogawa, Y. Kawakita, et al.: "An Approach to Renewable-Energy Dominant Grids via Distributed Electrical Energy Platform for IoT Systems", IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (2019).