

科学観測用海底ケーブルネットワーク技術報告書

給電システム (案) ver. 2.0

目次

- 3. 1 はじめに
 - 3. 2 給電システムに対する要求条件
 - 3. 3 交流給電方式
 - 3. 3. 1 通信用光海底ケーブルを用いた交流給電
 - 3. 3. 2 撚線型海底電力ケーブルを用いた交流給電
 - 3. 4 定電圧給電方式
 - 3. 5 定電圧／定電流ハイブリッド給電方式
 - 3. 6 直流定電流／直流定電流給電方式
 - 3. 6. 1 定電流／定電流給電方式の基礎的特性
 - 3. 6. 2 定電流／定電流変換器
 - 3. 6. 3 定電流／定電流変換器の計算機シミュレーション
 - 3. 6. 4 残された課題
 - 3. 7 方式間の比較
 - 3. 8 まとめ
- 参考文献

3. 1 はじめに

通信用光海底ケーブルシステムでは、海底ケーブルに挿入されている海底中継器に電力を送るために、海底ケーブル内の給電線を介して定電流給電を行っている。海底ケーブル内の給電線は1本で、電流の帰路には海水を利用している。

定電流給電は、海底ケーブルの両端に給電装置を設置して給電を行っている場合、万一海底ケーブルに短絡障害が発生しても、短絡地点の電位が地電位と等しくなるだけで、給電は続行できる利点を持っている。また、海底中継器内では、給電路にツェナーダイオードを挿入するだけでその両端から簡単に電力を取り出せること、また、海底中継器内の電子回路の電位がほぼ給電路の電位に等しいため、電子回路全体を絶縁体で覆うことにより、簡単に海水からの絶縁が確保できる利点を持っている。これらの利点が通信用海底ケーブルシステムで定電流給電方式が採用されている理由である。

一方、ARENA は、2章で述べたように、一部の区間では日本海溝を挟んでメッシュ状のループ構成を想定しており、従来のケーブルネットワークと全く異なったメッシュ状のネットワーク構造となっている。定電流給電方式では電流の分岐が容易でないため、従来の海底ケーブルシステム用定給電方式をそのまま利用することはできず、新しい給電方式を検討する必要がある。そこで、本章では、(a)定電圧給電方式⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾、(b)定電圧給電と定電流給電を併用した定電圧／定電流ハイブリッド給電方式、および(c)定電流給電から新たな定電流源を作り出す定電流／定電流給電方式⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾を提案し、これらの比較検討を行った。これらの検討は2章で示したケーブルネットワークモデルに基づいて行った。

検討を進めるのに当たり、まず要求条件を明確にすることが重要である。そこで、**3. 2**では、システムに対する基礎的な要求条件を明確にした。

給電方式の区分け方として、上述の定電圧、定電流、定電圧／定電流方式のような分け方の他、直流給電と交流給電で分けることができる。そこで、**3. 3**では、交流給電の検討を行ない、その減衰量が大きく、科学観測用海底ケーブルネットワークには適さないことを確認した。**3. 4**以後の検討は直流に限定して行った。

本フィージビリティスタディでは、定電流から別の定電流を分岐する新しい定電流／定電流変換器が提案された。この定電流／定電流変換器は、定電流／定電流給電方式を実現するためのキーデバイスである。定電流／定電流変換器のプロトタイプを用いた予備的実験とコンピュータシミュレーションを行ったところ、有望な将来性を予見する結果を得ることができた。

3. 4～**3. 6**では、基礎的な要求条件を元に、定電圧給電方式、定電圧／定電流ハイブリッド給電方式、定電流／定電流給電方式について検討を行った。これらの方式を総合的に比較した結果、**3. 7**では、想定した要求条件の下では、定電流／定電流給電方式がもっとも高い可能性を持っていることを示した。

3. 2 給電システムに対する要求条件

以下に給電システムに対する要求条件を示す。

(1) 給電電力

表3-1は各観測点の種類と数量を見積もったものである。消費電力の詳細は、第2章に記述されている。ノードは全部で66箇所である。ノード1カ所あたり地球物理観測点は2カ所に配置される。なお、表3-1に示す消費電力は現時点で予想される電力の必要最小限のものを見積もったものであり、今後実際のケーブルシステムを計画する場合には、見直す必要がある。

表3-1 各観測点の種類と数量の見積もり

	平均電力 (W)	観測点数	小計 (W)
地球物理観測点	15	132	1,980
孔内計測点	69	2	138
海洋物理化学観測点	121	10	1,210
測地観測点	11	43	473
アレイ観測点	4	2	8
カメラ観測点	212	2	424
AUV観測点	60	10	600
温暖化観測点	60	4	240
伝送・監視システム	200	66	13,200
合計			18,273
平均			277

(2) 給電線

海底ケーブルの構造は給電方式に大きな影響を与える。通信用光海底ケーブルは、最大水深8,000mまで敷設するだけでなく、修理のために回収可能となっている。また、浅海域での埋設作業なども考慮された構造を持っている。そのほか、長期的な信頼性と経済性はもとより、障害が発生したときの海底ケーブル内の水走り対策、高信頼性を持つ中継器へのフィードスルーと機械的カップリング、修理時の接続技術など、多くの技術的・経済的要求を満足するように開発されている。科学観測用ケーブルネットワーク用海底ケーブルも同じような性能が要求される。しかし、このような条件を満足し異なる構造を持つ海底ケーブルを開発するためには、莫大なコストと数年におよぶ開発期間が必要である。従って、ARENAでも通信用光海底ケーブルを使用することが妥当である。

通信用光海底ケーブルには給電線は一本しか含まれていない。リターン電流は海水を流れるように設計されている。このことは、科学観測用ケーブルネットワークの給電方式を検討する場合に大きな制限要素となる。

(3) 信頼性

給電システムに障害が発生すると、全体の観測ケーブルシステムに大きな影響を与える。特に、海中システムは修理や交換が容易ではないため、海中に設置する電源には高い信頼性が要求される。例えば、通信用の海底ケーブルシステムでは、システム全体で設計寿命である20年以内に数回程度の故障発生率を確保するように設計されている。しかし、科学観測用海底ケーブルネットワークの給電システムは通信用海底ケーブルシステムより複雑であり、部品点数も多いため、通信用海底ケーブルシステム並みの信頼性を個々のノード内の電源全てに要求することは困難である。従って、システム全体の信頼性を高めるためには、万一水中の給電システムに障害が発生しても、他の電源でバックアップできるようにするなどの対策を講じて、障害の影響が及ぶ範囲を最小限に留めるような設計が必要である。

（４）コスト

コストと信頼性は相反する。宇宙用や通信用海底ケーブルシステム用の高信頼性の部品を使えば装置の信頼性は高くなるが、このような高信頼性の部品は高コストである。また、部品の種類は限定されており、新たに開発する場合には膨大な費用が必要となる。そのため、汎用の部品を使用しつつ冗長性を高めることなどにより、システム全体としての信頼性を高めることが重要である。

（５）拡張性

目標とする大規模な科学観測用ケーブルネットワークは一度に連続的に作るよりも、数年に分けて順次構築していく方が、現実的である。従って、ケーブルネットワークは、いくつかのセグメントに分けることができ、セグメント単位でも運用が可能であり、また、ネットワークは容易に拡張できることが要求される。

（６）ケーブル障害時の影響範囲

深海で使用される無外装光海底ケーブルは、給電路の保護はポリエチレン層だけなので、この絶縁層が破壊されて給電路が海水に地絡する障害が発生する可能性がある。このような障害が発生した場合に影響を受けるケーブル区間を最小限とし、他の区間は給電可能にする必要がある。

（７）敷設・回収作業への対応

海中給電分岐装置（PBU）の敷設には、2本の海底ケーブルを同時にハンドリングする機能を持つケーブル敷設船を用いることが想定される。PBUの寸法、重量は、このようなケーブル敷設船で扱うことができるものとする必要がある。また、万一PBUに障害が発生した場合には、これを船上に回収する必要がある。PBUは、回収方法を考慮した設計とする必要がある。また、海中ノード分岐装置（NBU）と海中ハブ装置（UHU）内の電源装置も敷設と回収条件を考慮してその寸法と重量を制限する必要がある。

（８）耐サージ特性

海底ケーブルに地絡障害が発生すると、海底ケーブルには大きなサージ電流またはサージ電圧が発生する。例えば、海底ケーブルの電位を8kV、特性インピーダンスを40と仮定すると200Aのサージ電流が発生す

る可能性がある。給電システムはこのようなサージ電流、電圧に耐える必要がある。

(9) EL (Electroding: 給電電流への低周波交流電流の重畳)

海底ケーブルの埋設作業やメンテナンスには ROV が使用される。ROV が海底ケーブルを追跡するために、海底ケーブル給電路に低周波数の電流を重畳し(EL)、発生する低周波数磁場を利用して ROV を誘導する技術が一般に使用されている。このような EL の機能が、陸上の給電装置と PBU に必要とされる。

(10) 効率と発熱

信頼性の観点から、海中分岐装置内の電源に空冷用のファンを用いることは困難と予想される。そのため、効率の良い放熱方法を実現することが大きな技術的課題の一つといえる。また、放熱の問題を解決するためには、効率を高め、発熱量を低減することも重要である。

(11) 負荷変動への対応力

大別して、2種類の負荷変動が考えられる。

第1は音響トモグラフィのように、パルス状の大出力を要するものである。この負荷変動に対応するためには、2次電池か大容量の電気2重層コンデンサを用いることが考えられる。2次電池や電気2重層コンデンサの長期信頼性を含めて検討する必要がある。

第2はセンサやノードの追加や切り離しによる負荷変動である。電源設備はこのような負荷変動に対応できることが要求される。

3. 3 交流給電方式

陸上の電力伝送では交流低電圧給電方式が一般に利用されている。交流給電はトランスによる電圧変換が容易という大きな利点を持っている。そこで、ここではまず交流給電方式について検討する、

要求条件 (2) 中で、海底ケーブルとして通信用光海底ケーブルを用いることを指摘したが、ここでは海底ケーブルとして燃線型の海底電力ケーブルも対象として含め、その伝送効率を検討した。

3. 3. 1 通信用光海底ケーブルを用いた交流給電

光海底ケーブルの給電は海底ケーブル内の一本の給電線を用いて行われ、電流の岐路には海水が利用される。この場合の伝播定数は次式で表される。

$$\gamma = \sqrt{j\omega C_0(R_0 + j\omega L_0)} \quad (1)$$

ここで、

R_0 : 単位長当たりの直流抵抗 (Ω/m)

L_0 : 単位長当たりのインダクタンス (H/m)

C_0 : 単位長当たりの海底ケーブル内給電線と海水間のキャパシタンス (F/m)

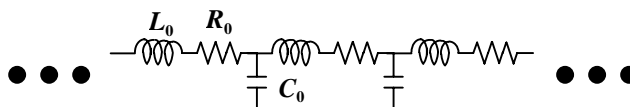


図3-1 海底ケーブルの等価回路

R_0 、 L_0 、 C_0 を用いた海底ケーブルの等価回路を図3-1に示す。 $L_0 \ll R_0$ であるので、(1) は次式で近似される。

$$\gamma = \sqrt{j\omega C_0 R_0} = (1 + j) \sqrt{\frac{\omega C_0 R_0}{2}} \quad (2)$$

伝送損失は次式で表される。

$$\eta = 20 \sqrt{\frac{\omega C_0 R_0}{2}} \log(e) \text{ (dB/m)} \quad (3)$$

OS 光海底ケーブルでは、 $C_0 = 1.44 \times 10^{-10}$ F/m、 $R_0 = 7.2 \times 10^{-4}$ Ω/m なので、伝送損失は

1Hz で -4.9dB/1,000km

10Hz で -17 dB/1,000 km

50Hz で -38 dB/1,000 km

である。このように伝送損失が大きいため、交流給電を行うためには、周波数を 1Hz 以下に下げる必要があ

るが、この場合、トランスが大きくなり、現実的でない。

3. 3. 2 撚線型海底電力ケーブルを用いた交流給電

電力業界では、光ファイバを複合させた海底電力ケーブルによって離島等への電力伝送が広く行われている。そこで、海底電力ケーブルによる交流電力給電について検討する。

海底電力ケーブルとして、日立電線(株)製海底電力ケーブル「22kV CV 3x60SQ」を例に取り、伝送損失を計算してみる。このケーブルの1次定数は以下のとおりである。

$$R_o=0.397 \ \Omega/\text{km}$$

$$L_o=384\text{mH}/\text{km}$$

$$1/G_o=30600 \ \Omega \cdot \text{km}$$

$$C_o=0.183 \ \mu\text{F}/\text{km}$$

この値を与えて、減推量を計算してみると、商用周波数（50Hz）ではほぼ

$$35.5\text{dB}/1000\text{km}$$

となる。この値は、通信用光海底ケーブルを用いた場合と大差なく、やはり実用的でない。

3. 4 定電圧給電方式

定電圧給電方式 (図 3- 2) の最大の利点は海中での電力分岐が容易であることである。一方、海底ケーブルにショート障害が発生した場合、何らかの対策を施さないとシステム全体の電圧が低下し、システム全体の動作に影響を及ぼす問題がある。海底ケーブルの短絡障害に対する有効な対策の有無が、定電圧方式を選択するための重要なポイントの一つとなる。

各ノードでは高電圧直流電源から観測・通信機器用の定電圧源を作る必要がある。この定電圧電源に短絡障害が生じると、やはりシステム全体の電位が低下し、他のノードにも影響を及ぼすことになる。このような障害の波及を防ぐため、ノード内の定電圧源に短絡障害が生じた場合には、この定電圧源を給電線から自動的に切り離す必要がある。また、給電線に短絡障害が発生した場合には、障害が発生した区間の給電線を他の区間から電氣的に切り離す必要がある。さらに、障害時に給電が停止した後給電の再立ち上げを行う場合、切り離された区間を再接続したり、コマンドにより再度切り離す機能も必要である。

図 3- 3 はこのような機能を満たす電源の一構成案⁽³⁾である。本例では電源を 2 重化することにより、電源全体の信頼性を高めている。一方の電源が短絡した時にラッチリレー Rly1a または Rly1b が動作し、短絡した電源を給電線から切り離す。

海底ケーブルの短絡障害に対しては、リレー Rly2a とリレー Rly2b により、障害となったケーブルを切り離す。例えば、右側の給電線が短絡した場合、短絡電流がリレー Rly2b とダイオード D2a を介して流れる。

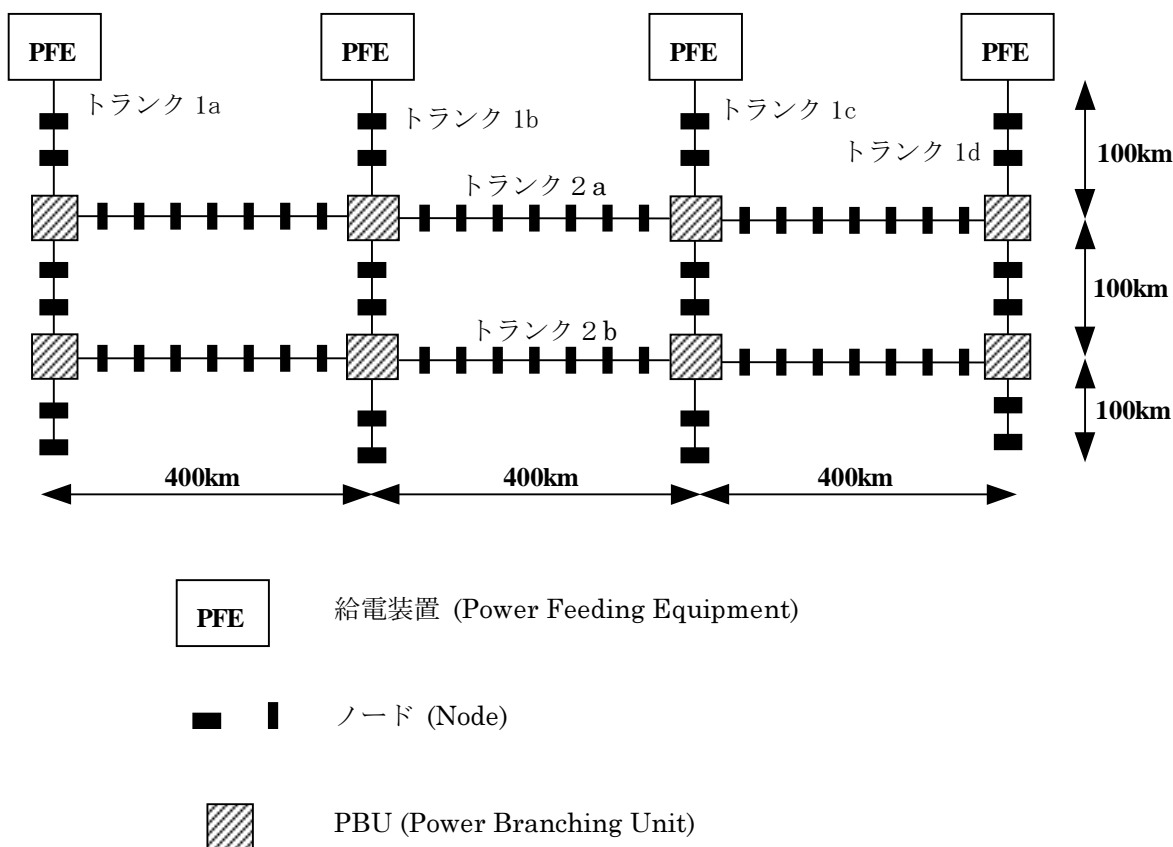


図 3- 2 定電圧給電システム

この短絡電流がリレーRly2bを動作させ、右側の給電線を切り離す。この場合、ダイオードD2aの働きにより、リレーRly2aは動作しない。ノードへの給電は、引き続き、左側の給電線とダイオードD2aを介して行なわれる。左側の給電線が短絡した場合にはリレーRly2aが動作し、左側の給電線を切り離す。抵抗R1aとR1bはリレーRly2aとRly2bの感度を調整するものである。各ノードのリレーの感度を調整することにより、短絡障害点に最も近いリレーを動作させることが可能になる。すなわち、リレーRly2bの感度は、右側のノードの方が次第に高くなるようにする。また、リレーRly2aの感度は、左側のノードの方が次第に高くなるようにする。この場合、ケーブルの短絡障害が一箇所であれば、障害点両端のリレーが働き、障害区間を電気的に切り離すことにより、すべてのノードへの給電が可能となる。理想的な場合には、障害点に最も近いリレーのみが動作することになるが、感度のばらつきや動作時間のばらつきにより、複数のノードのリレーが動作することも考えられる。誤動作に対処するため、ラッチリレーRly2aとRly2bは陸上からのコマンドにより再投入できる必要がある。また、左右の給電線を接続する前に、ケーブルの絶縁を測定する機能を持つ。

このほか Kirkham et al^{(1),(2)}は定電圧給電方式の障害対策として、高速ネットワークを用いたネットワークの保護システムや電流電圧特性から障害点までの距離を計算してブレーカを制御するシステムを提案している。また、Schneider et al.⁽⁴⁾はケーブル障害に対応する他の方法として、陸揚げ局に近いノードから順番にブレーカを接続し、給電を行っていく方法を提案している。ブレーカを投入する前に抵抗測定などにより

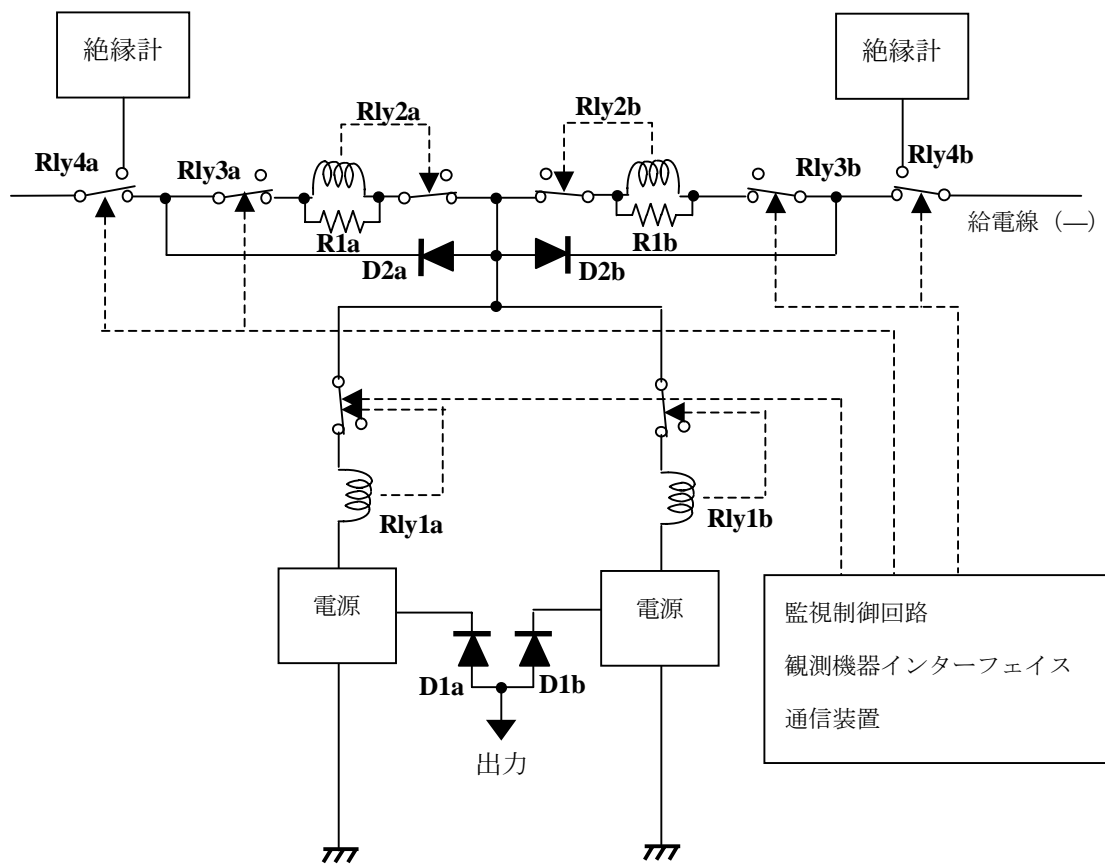


図3-3 定電圧給電方式におけるNBU内電源の構成案

隣接区間のケーブル障害探査を行うことが可能となる。

図3-4はノード内定電圧源の内部構造の一案を示したものである。スイッチング素子として MOS-FET を想定した場合、素子の電圧制限のため数 kV の電圧を入力とする DC/DC 変換器を実現するのは困難と予想される。数 kV の高圧の直流電源を入力とする DC/DC 変換器を実現するためには、図3-4に示すように複数 (n 段) の変換器の入力を直列に接続し、一段当たりの変換器への入力電圧を下げるか、大電力用サイリスタ等を使用した特殊な DC/DC 変換器を開発する必要がある。図3-4の方法の場合、入力電圧が各変換器に均等に分担される必要がある。以下に、この問題について考察する。なお、VENUS システムでは、定電流源を使用した多段の変換器を実現している。

各変換器の障害に備えるためには、入力段には電流をバイパスするためのリレーが必要である。変換器の段数の選択は、スイッチングに使える素子の最大定格、効率、寸法等を考慮する必要がある。なお、各変換

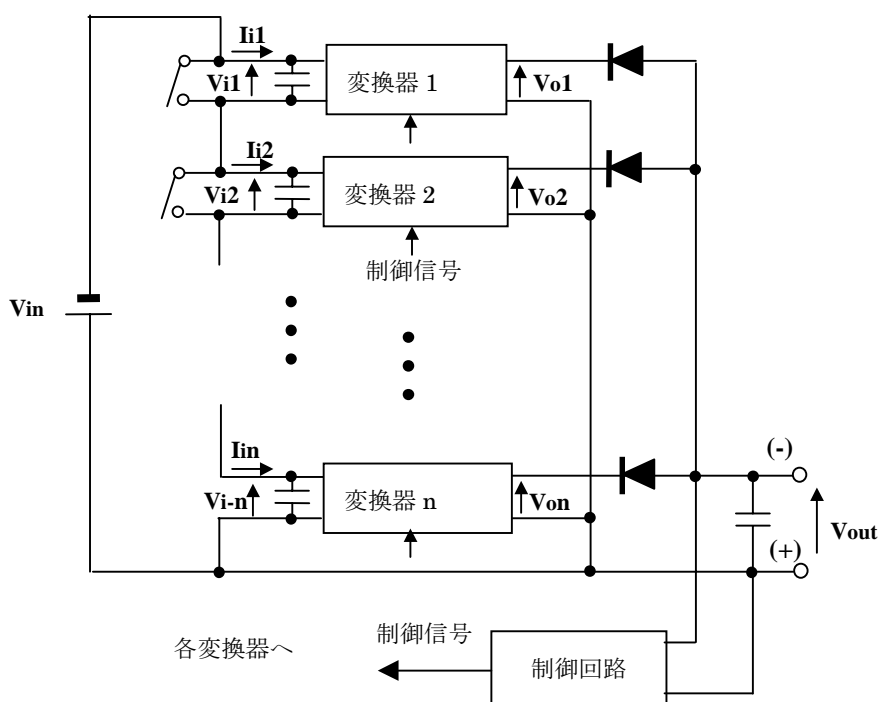


図3-4 変換器の接続案

器の出力は並列に接続されているので、いくつかの変換器に障害が発生しても、出力電圧が低下することはない。また、低入力電圧時には1-2個の変換器のみ動作させるような回路を加えることにより、許容入力電圧範囲を広げることも可能である。(図3-4の回路では、変換器nの入力にはリレーが挿入されておらず、低入力電圧 (= 起動時の低入力電圧) に動作する。起動時には他の変換器の入力はリレーで短絡しておく。) このような機能は特に起動時のラッシュカレントを抑制するのに有効である。

以上提案した電源の構成や障害対策はこれまでに例のないものである。今後さらにその動作の確認や信頼性や寸法、放熱等について検討を加える必要がある。また、スイッチング素子として、MOS-FET のほか、IGBT や GTO などの素子を検討する必要がある。

図3-5は定電圧方式用PBUの一つの構成案である。障害が発生し、過電流が検知されたケーブル区間は、ラッチリレーにより電氣的に切り離される。ラッチリレーはコマンドにより、再接続できる必要がある。このPBUはケーブル障害位置測定用に、切り離された給電路の抵抗と絶縁測定機能を内蔵する。トランク1とトランク2はダイオードを介して接続することにより、PFEあるいはトランク1に地絡障害が生じてても、トランク2には隣接するPBUから給電が続行される。

最後に、図3-2において右側3台のPFEに障害が発生し、左端のPFE1台で全システムの給電を行った場合の給電電流電圧を計算してみる。この場合給電されるノードは、トランク2aとトランク2bの上のノード42箇所と、左端のPFEにつながるトランク1aの上にあるノード6カ所である。各観測点における消費電力を356W(電源の効率を0.85、電源の出力を277Wと仮定)、海底ケーブルの電気抵抗を0.7 /km、PFEの出力電圧を3,948Vと仮定すると、PFEの出力電流は6.16A、PFEから最も離れた観測点の電圧は2,000Vとなる。

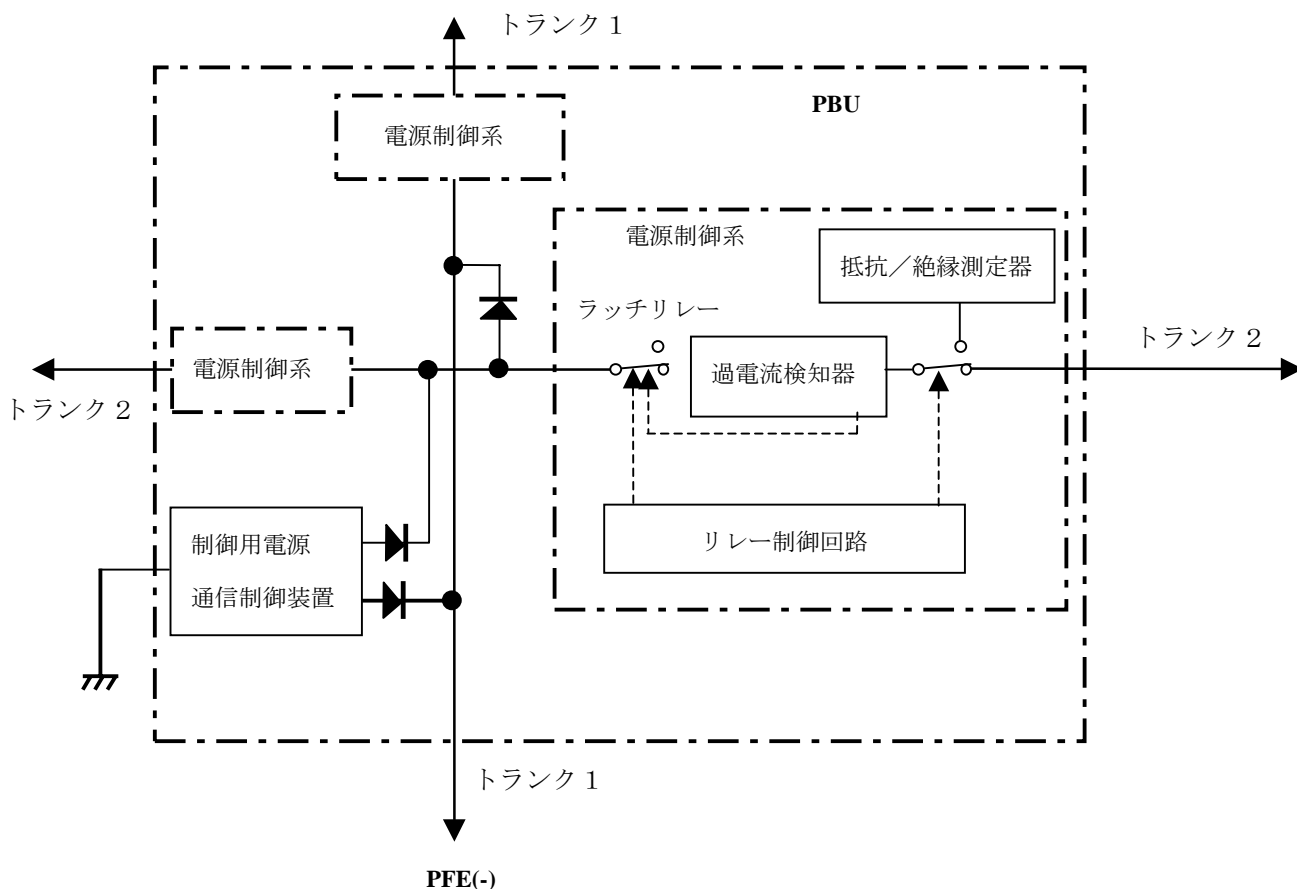


図3-5 定電圧給電方式におけるNBU内電源の構成案

3. 5 定電圧／定電流ハイブリッド方式

定電流給電と定電圧給電の特徴を組み合わせたハイブリッド方式の構成を図3-6に示す。

定電圧／定電流ハイブリッド方式では、トランク1への給電は定電圧方式で行う。トランク1とトランク2の交点に設けたPBUはトランク2への給電を定電流方式で行う。この方式は給電の分岐が容易であるという定電圧給電方式の特徴と、海底ケーブル障害に強く、電子回路の海水からの絶縁が容易という定電流給電方式の特徴を組み合わせたものである。またPBUの電源は定電圧電源であるので、定電流源を電源とする電源にみられる低負荷時に効率が低下する問題がない。

PBUの構成の一例を図3-7に示す。この例では、左右のトランク2へ給電する定電圧／定電流変換器を一台のPBU内部に納めることを想定しているが、2台に分割することも可能である。この場合、定電圧／定電流変換器の出力端の一つは海水アースに接続される。また、海底ケーブル障害などに対応するために、陸上からの制御コマンドによりスイッチS1、S2、S3を制御し、障害となった海底ケーブル区間を切り離せるようにする必要がある。

本方式では、PBUに障害が発生した場合には、隣接するPBUがバックアップを行う。例えば、図3-6においてPBUb1に障害が発生した場合には、PBUa1とPBUc1を用いて、トランク2aとトランク2bへの給電をおこなう。この場合、PBUb1に流れる電流は、PBU内部の定電圧／定電流変換器と並列に接続されているダイオードにバイパスされる。ノードの消費電力を404W（効率を0.75と仮定）、海底ケーブル給電線の抵抗を0.7 /km、定電流値を1Aとすると、PBUの出力は以下の通りになる。

(1) 正常時のPBUc1の出力 (他のPBUも同じ)

電力を供給するノード 片側3.5台

消費電力 $404\text{W} \times 7 \text{台} = 2828\text{W}$

ケーブルロス $2 \times \text{片側 } 200 \text{ km} \times 0.7 \Omega / \text{km} \times (1 \text{ A})^2 = 280\text{W}$

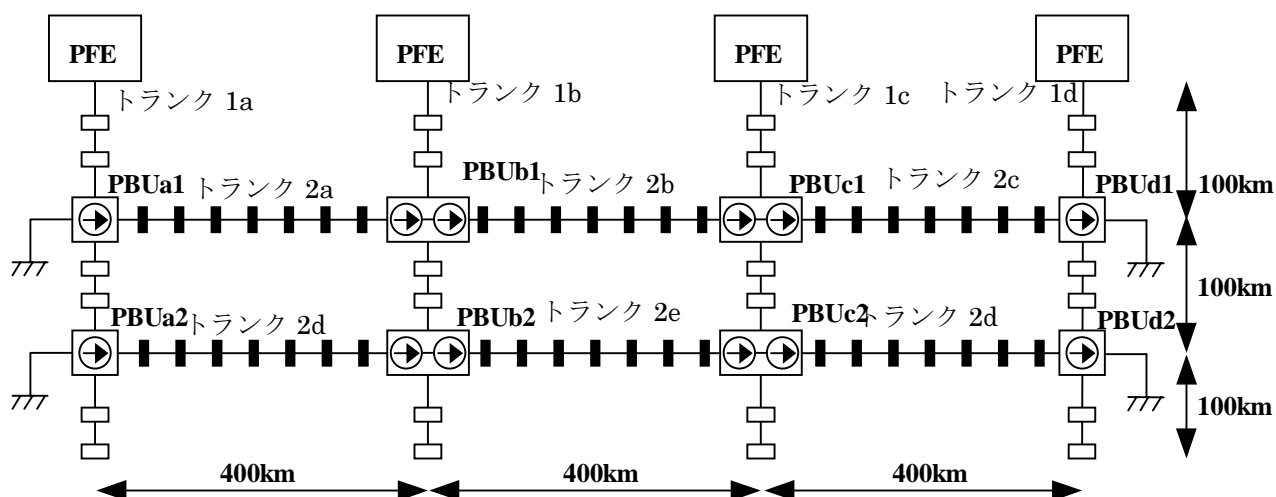


図3-6 定電圧／定電流ハイブリッド方式の構成

トランク2への給電は定電流方式で、トランク1に設けたPBUから給電される。トランク1の給電は、定電圧方式で行う。

出力電力の合計は約 3.1KW (出力電圧 3.1KV)

入力電力は効率を 85%とすると約 3.65KW (入力電圧 3.65KV)

(2) PBUb1 が障害の場合、PBUc1 の出力

電力を供給するノード 10.5 台

消費電力 $404W \times 10 \text{ 台} = 4040W$

ケーブルロス $600 \text{ km} \times 0.7 \Omega / \text{km} \times (1 \text{ A})^2 = 420W$

出力電力の合計は約 4.46KW (出力電圧 4.46KV)

入力電力は効率を 85%とすると約 5.25KW (入力電圧 5.25KV)

効率を 0.85 と仮定すると、PBUb1 が障害の場合その発熱量は 0.79kW になる。発熱と放熱の検討を十分に行う必要がある。障害部分のノードは、地震計などの主要な観測機器のみを稼働させるようにし、それ以外は休止させることによって、全体の消費電力を抑えることも一つの案である。

ここで、水中定電流源の寸法と重量を推定してみる。既存の水中電源の実績と余裕を考慮し、最大出力電力を 4.46kW、電力/容積を 18W/L と仮定すると、容積は 248 Liter になる。電源は円柱形とし、その内径を 390mm とすると、長さ (内寸) は約 2,080mm になる。

この方式は、定電圧給電方式と定電流給電方式の特徴を組み合わせたものであるが、大規模な PBU が必要であること、各ノードの電源として定電圧給電方式用と定電流給電方式用の 2 種類の電源を開発する必要が生じ、開発コストが増大する問題がある。また、保守の負担も増大する。

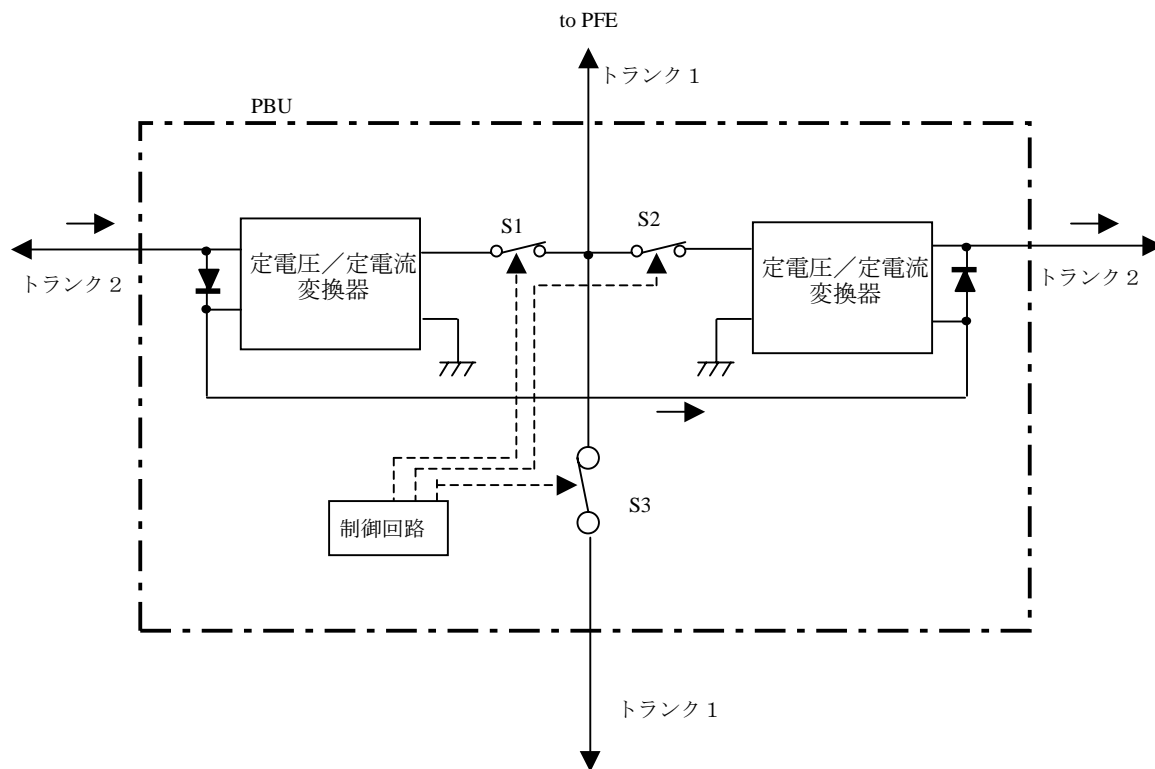


図 3-7 定電圧/定電流ハイブリッド方式用 PBU の基本構成

3. 6 定電流/定電流給電方式

3. 6. 1 定電流/定電流給電方式の基礎的特性

定電流給電方式では、通常 2 台の定電流源がケーブルの両端に配置される。定電流源は図 3-8 にしめす用に、理想的定電流源、出力アドミッタンス、電圧リミッターから構成される。出力アドミッタンスは両端の定電流源の出力バランスをとるために重要な役割を果たしている。

図 3-9 はケーブルの両端に配置された定電流源の動作概念を示したものである。過負荷を防ぐため、出力電圧は制限されている。理想的な定電流源では、出力電圧によらずに出力電流は一定の値を保つが（出力電圧が制限電圧以下の定電流領域）、出力アドミッタンスがあることにより、出力電流は出力電圧により僅か

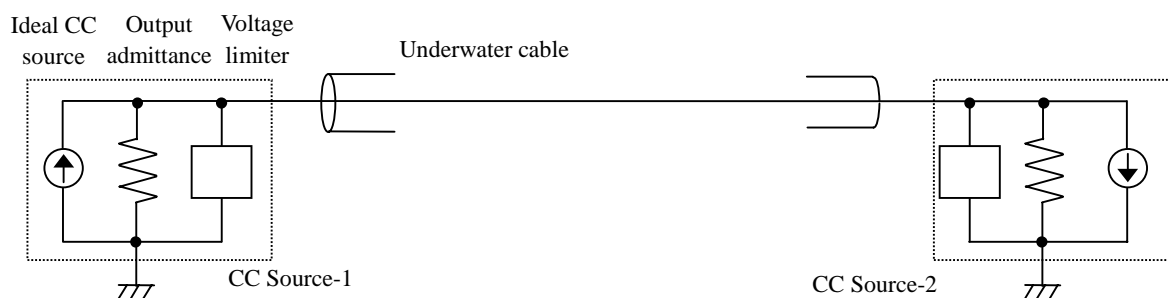


図3-8 定電流給電方式における定電流源の配置

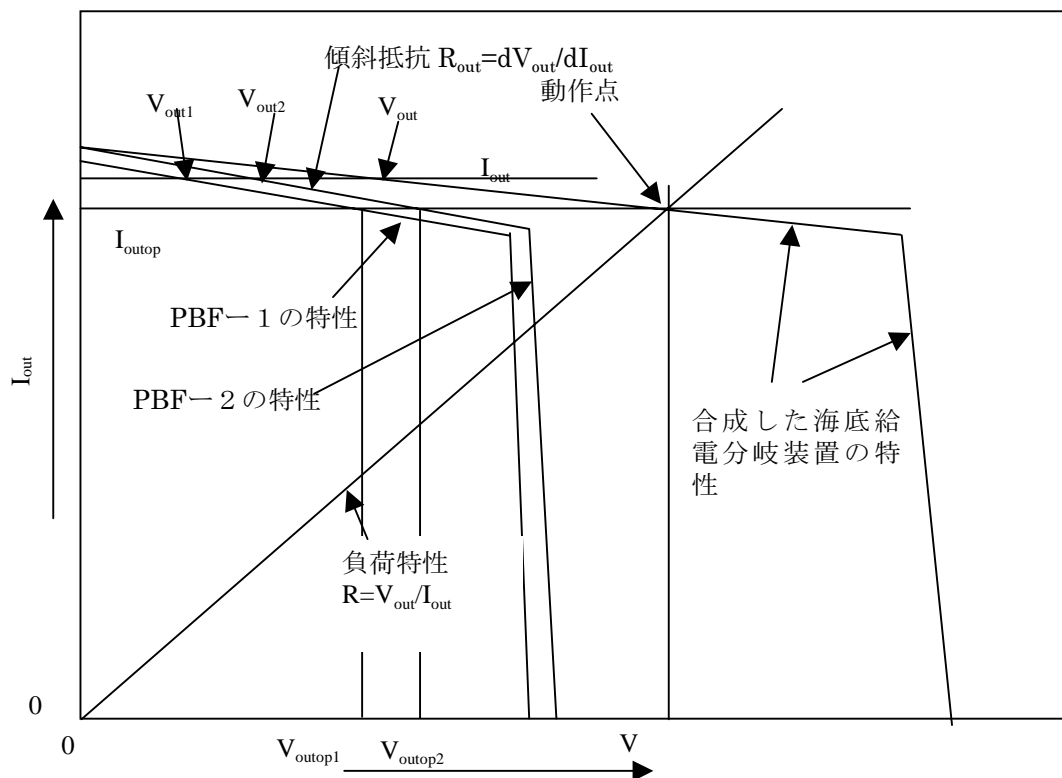


図 3-9 定電流/定電流方式の海底給電分岐装置の動作概念

に変動する。その変動量は傾斜抵抗 $R_{out}=dV_{out}/dI_{out}$ で表される。ここで、2台の定電流源の出力を合成することにより、**図3-9**も示す一台の合成電流源を想定することができる。合成電流源の出力電圧 V_{out} は2台の電流源の出力電圧 V_{out1} と V_{out2} を合算したものになる。

$$V_{out}(I_{out})=V_{out1}(I_{out})+V_{out2}(I_{out}) \quad (9)$$

定電流源の負荷を純抵抗 R と仮定すると、動作電流と動作電圧は、合成電流源の出力特性と負荷特性の交点として求められる。定電流源 CC Source-1 と CC Source-2 の動作電圧をそれぞれ V_{outop1} と V_{outop2} とすると、合成電流源の動作電圧は $V_{outop}=V_{outop1}+V_{outop2}$ で表される。2台の定電流源が出力電圧を分担して定電流源として動作するためには傾斜抵抗が重要であることは明白である。

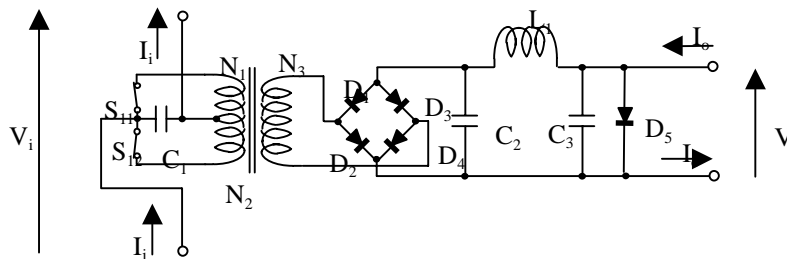


図3-10 定電流/定電流給電変換器の構成

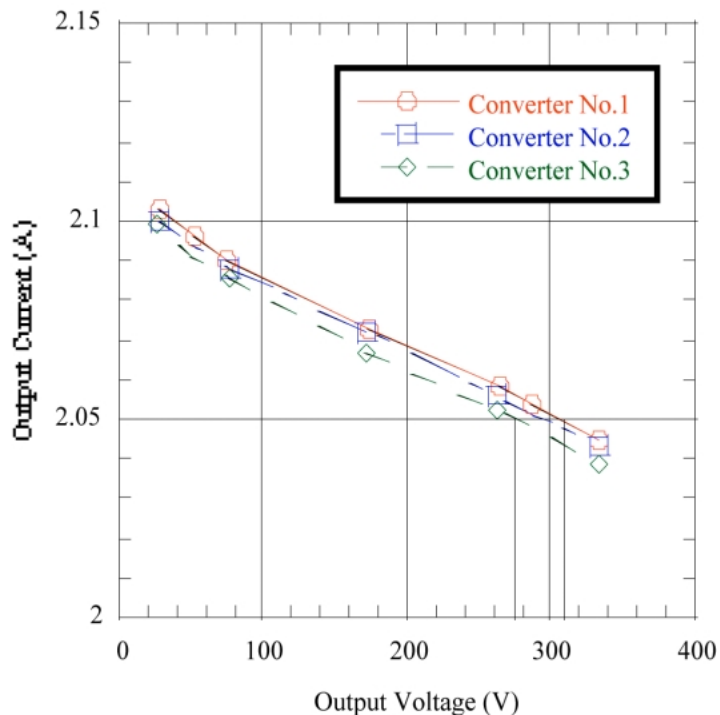


図3-11 3台の定電流/定電流変換器プロトタイプの実出力特性

3.6.2 定電流/定電流変換器

定電流/定電流給電方式では、トランク2に流れる定電流はPBU内の定電流/定電流変換器を用いてトランク1に流れる定電流から作られる。**図3-10**は提案された定電流/定電流変換器の基本的回路図である。入力端の定電流はスイッチング素子 FET1 と FET2 によりスイッチされ、トランスに入力する。トランスの出力は整流されてフィルタを通過する。出力電流値は入力電流値とトランスの巻き線比により決定される。基本回路は簡単でフィードバック回路もないことから、高度な信頼性と高い変換効率を期待することができる。しかし、次の点を検討する必要がある。

- (1) 定電流をスイッチする素子の信頼性
- (2) 出力電力を増加させるために、定電流/定電流変換器を直列接続することは可能か？

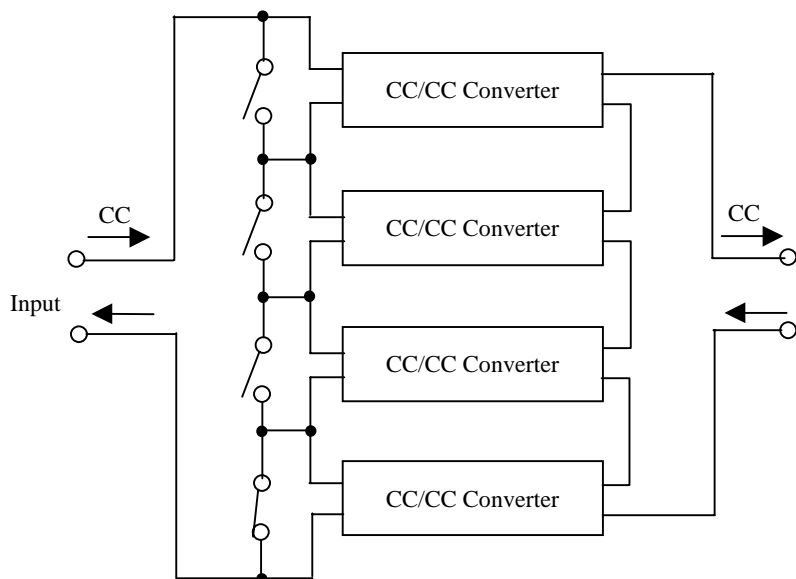


図 3-12 PBU 内の定電流源の構成の一例

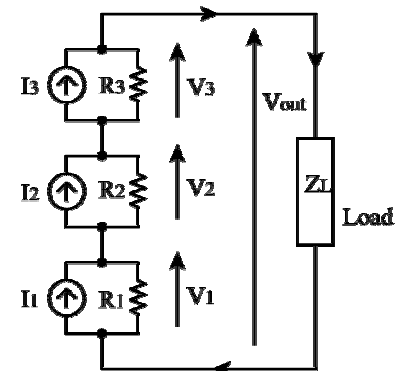


図 3-13 3台の変換器が直列接続された場合のモデル

- (3) 過剰な突入電流を防ぎながら給電を立ち上げることは可能か？
- (4) 圧力容器に収納可能なように小型化と高効率化はできるか？

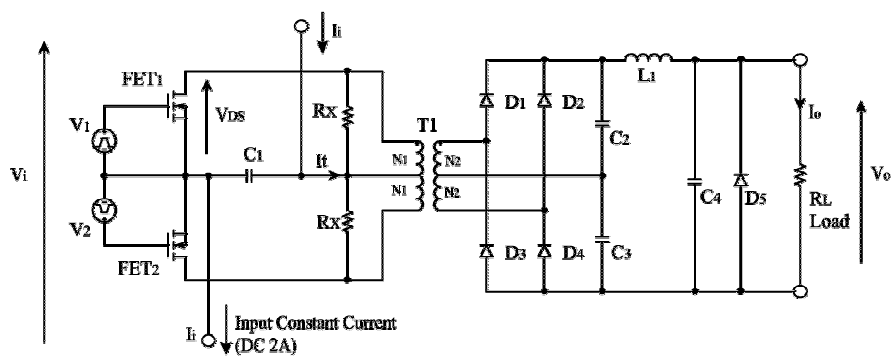


図 3-14 計算機シミュレーションに用いた定電流/定電流変換器の電子回路図

このような問題に取り組みするために、プロトタイプを制作し基本的な評価を行った。以下は、k. Asakawa⁽⁸⁾からの引用である。

図 3-11 は 3 台の定電流/定電流変換器の出力電圧電流特性の測定結果を示したものである。変換器は適切な傾斜抵抗(5.6k)と類似の出力特性を持っている。このことは 3 台の変換器を直列に接続して出力を分担できることを示している。

図 3-12 は PBU 内の定電流源の代表的な構成を示したものである。これらの入力と出力ともに直列に接続されている。変換器の内一台は予備で、その入力は短絡されている。動作中の変換器に障害が発生した場合には、その入力は短絡され、予備の変換器が動作を開始する。図 3-12 に示した 3 台の変換器が直列に接続され、その電流値が 2.05A と仮定すると、3 台の変換器の出力電圧は 275V から 310V の間に収まる。電流値を 2.05A とすると、PBU に要求される出力電力は 3.9kW となる。この 3.9kW の出力電流を実現するためには、8 台の変換器を直列に接続する必要がある。

図 3-10 は 3 台の変換器が直列に接続された場合の単純化したモデルを示している。それぞれ

の変換器は理想的定電流源 I_1 と出力抵抗 R_1 で記述される。それぞれの変換器の出力電圧 V_i は I_1 と R_1 に依存する。仮に、 I_1 と R_1 のばらつきが大きいと、出力電圧のばらつきも大きくなり、それぞれの変換器は出力電力を分担することが困難になる。そのため、すべての変換器の I_1 と R_1 がお互いに一致することが重要である。 I_1 と R_1 はトランスの結合係数、コアの損失と FET の抵抗に依存するので、これらの値のばらつきと出力特性の関係を調べておくことが重要である。以下は、この関係を調べるために行った計算機シミュレーションの結果である。

3. 6. 3 定電流／定電流変換器の計算機シミュレーション

計算機シミュレーションは汎用の電子回路シミュレーションソフトウェアを用いて行った。シミュレーションに用いたモデルは、**図 3-14** のプロトタイプをベースとしたものである。シミュレーションの精度はトランスのモデルに大きく依存する。ここでは、線形のコアを用いたが、これは実際の磁束密度が飽和磁束密度よりもかなり低いためである。線型モデルではトランスはそれぞれの巻き線に対応する隠田区タンスと結合係数で表される。インダクタンスの値には測定値を用いた。**図 3-14** の中で、トランスの一次側にある抵抗 R_x はフェライトコアの損失、FET のスイッチング損失と巻き線の抵抗を代表したものである。

図 3-15 は観測された波形とシミュレーション結果を示したものである。上側の 2 つの波形は FET のソース：ドレイン間の電圧を示し、下側の図はトランスへの入力電流 I_1 を示している。このシミュレーションではシミュレーションの波形が測定値と一致するようにトランスの結合係数を選択した。このようにして得た結合係数は **0.992** であり、このあたいは漏れインダクタンスを用いて計算した値 **0.994** に良く一致して

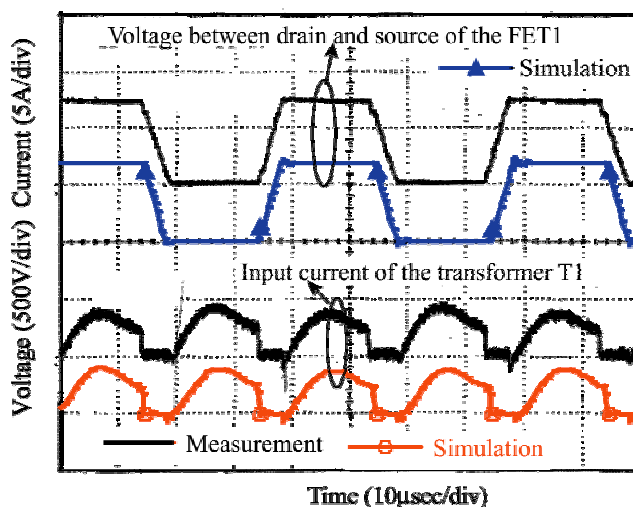


図 3-15 計算機シミュレーションで求めた波形と測定結果との比較

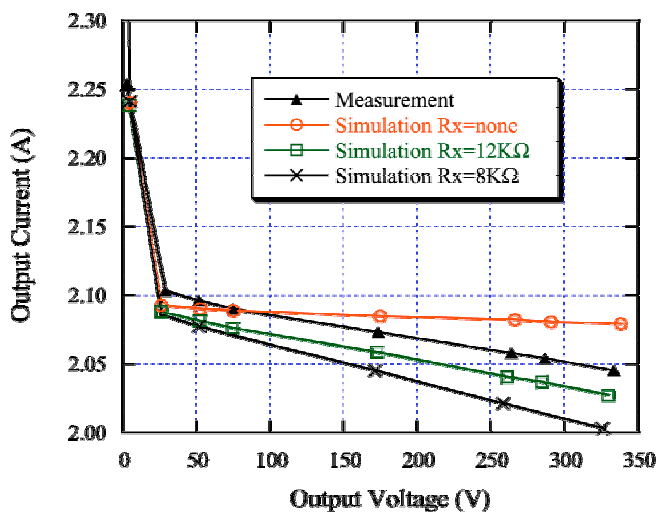


図 3-16 トランスと FET の損失を代表する抵抗 R_x と出力特性の関係

いる。シミュレーション結果が測定結果と良く一致していることは、シミュレーションで用いたモデルが妥当であることを示している。

図 3-16 は出力特性と抵抗 R_x との関係を示したものである。 $R_x=12k\Omega$ としたときのシミュレーション結果は測定値と良く一致している。抵抗 R_x のばらつきが出力特性に影響を与えることが確認される。

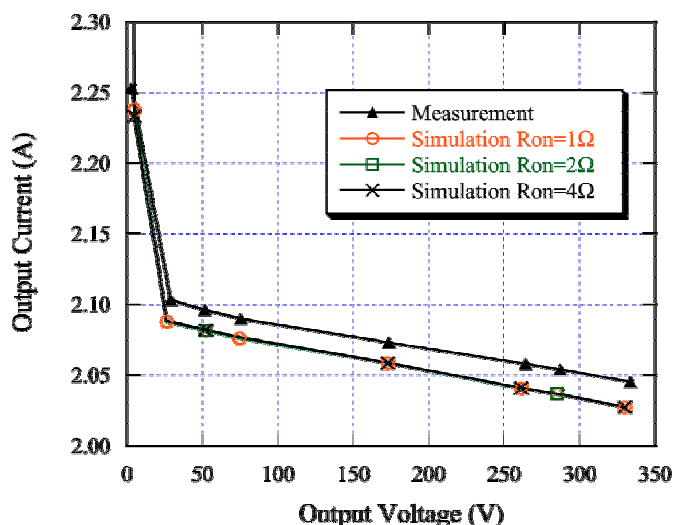


図 3-17 FET のオン抵抗と出力特性の関係

図 3-17 は FET のオン抵抗をパラメータとしたときの出力特性を示したものである。FET のオン抵抗のばらつきは出力特性にほとんど影響を及ぼさないことが確認できる。これは、変換器は定電流で駆動されるためである。同じ理由により、トランスの巻き線抵抗も出力特性に与える影響は小さい。しかし、これらの抵抗値は変換器の効率に影響を及ぼす。

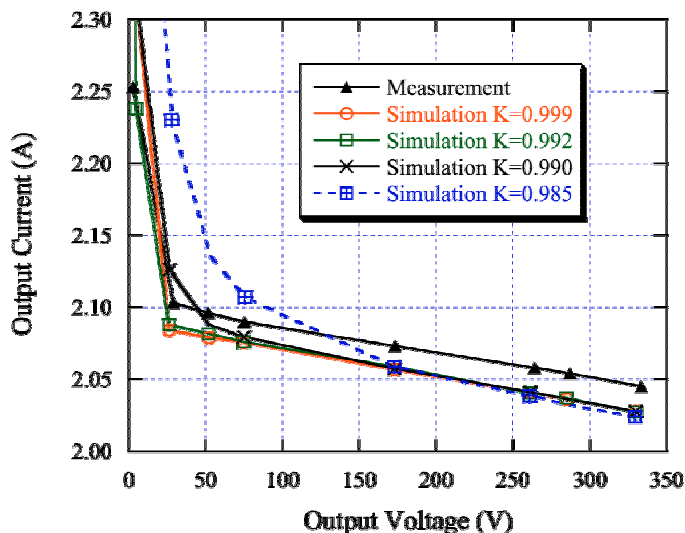


図 3-18 トランスの結合係数と出力特性の関係

図 3-18 はトランスの結合係数をパラメータとしたときの出力特性を示したものである。この図から、結合係数が 0.99 以上の場合、そのばらつきが出力特性に与える影響は小さいことが確認できる。一般に、0.99 以上の結合係数は妥当な値と考えられる。

図 3-19 は変換効率を出力電圧の関数として示したものである。スイッチング素子の駆動回路と制御回路の消費電力は除いて

いる。電圧が高い領域ではシミュレーション結果と測定値が良く一致している。また、電圧が高い領域では 95% の変換効率を得られている。この高電圧領域での損失の内訳を表 3-2 に示す。コアの損失は約 3 W と推定される。FET のスイッチング損失が大部分を占めることは明らかである。

3.6.4 残された課題

実験と計算機シミュレーションにより、定電流/定電流給電方式の基本的な可能性が示された。提案され

た定電流／定電流変換器の基本的な機能と特性は優れたものである。しかし、次の課題が残されている。

(1) 信頼性

システムの信頼性は冗長性を増すことにより高められている。しかし、さらに詳細な検討が必要である。

(2) 寸法、重量と船上での取り扱い

3. 2節で述べたように、ケーブル敷設船上での扱いは重要な問題の一つである。これは形状や重量に関係してくる。放熱や海水からの電氣的絶縁も形状や重量に影響を与える。このような問題に取り組むためには、PBUとNBUのプロトタイプを設計し試作する必要がある。

(3) サージ保護

海底ケーブル通信システムで採用されているサージ保護方式がARENAにも適応できると予想されるが、さらに注意深く検討する必要がある。

(4) 給電立ち上げ立ち下げ手順

給電の立ち上げと立ち下げにおいて、負荷の急激な変動によるチャタリングに対する対策が必要である。この対策は計算機シミュレーションとモデルを用いた実験により確認する必要がある。

(5) 全体システムの安定性

長尺の給電線を持つシステムの安定性を計算機シミュレーションで確認する必要がある。電力給電線の伝搬特性を考慮する必要がある。

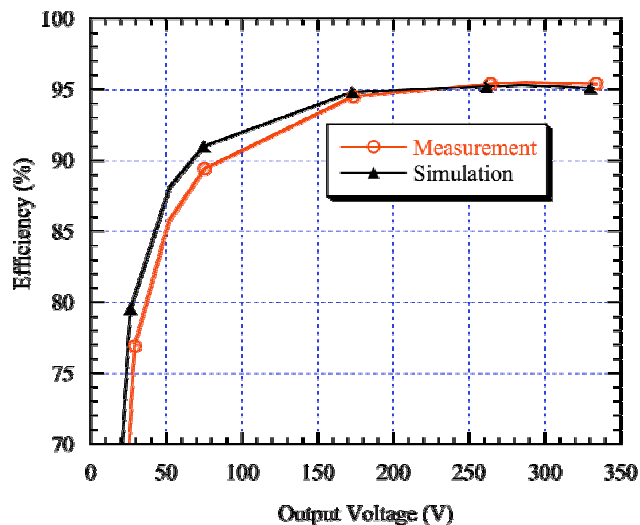


図3-19 定電流／定電流変換器の変換効率

3. 7 方式間の比較

本章ではまず交流給電方式が検討されたが、この方式では伝送損失が大きく、非現実的であることが分かった。**3. 4節**から**3. 6節**では定電圧給電方式、定電圧／定電流ハイブリッド給電方式、定電流／定電流給電方式が検討された。しかし、定電圧／定電流ハイブリッド給電方式は観測ノード用に定電圧入力と定電流入力の2種類の電源を開発する必要があることから、開発コストが高まることが予期できる。そこで、本節では定電圧給電方式と定電流／定電流給電方式について比較を行う。

(1) 信頼性

定電圧給電方式の利点は PBU において容易に電力を分岐することができることである定電流／定電流給電方式では比較的複雑な定電流源を PBU 内に設ける必要がある。分岐する電力が大きい場合には、電流源の寸法と発熱量が大きくなり、高信頼性を確保することが難しくなる。ケーブル敷設船上での取り扱いも難しくなる。定電流／定電流給電方式における PBU の信頼性は要求される電力に依存するので、さらに注意深く検討する必要がある。

一方、NBU 内の電源については、定電流／定電流給電方式の場合の方が定電圧給電方式にして開発が容易である。同様な電源が VENUS プロジェクトにおいてすでに開発されている。定電圧給電方式の場合、NBU の入力電圧は 2-3kV と想定される。入力電圧を 3kV と想定し、DC/DC 変換器の入力電圧を 300V と仮定すると、10 台の DC/DC 変換器を直列に接続する必要がある。このことは、NBU の信頼性を低下させる。

(2) 拡張性

両システムとも拡張性は確保されている。

(3) ケーブル地絡障害に対する耐力

3. 1節で述べたように、定電流給電方式はケーブル地絡障害に対して耐力を有している。定電流源をケーブルの両端に配置することができれば、単一の地絡障害が発生してもシステムは給電を続けることができる。同様な対策が定電流／定電流給電方式に利用することができる。

一方、定電圧給電方式に関しては、地絡障害に対する対策が**3. 4節**で提案されているものの、比較的複雑な方式であり、確立されたものではない。提案した方式を実用化するためには、さらに精力的な研究が必要である。また、定電圧給電方式のもう一つの問題点は、地絡障害の場合の給電再立ち上げの手順が複雑であり、時間がかかることである。ケーブル敷設線で修理を行っている場合などは、迅速な作業が要求される。

(4) 船上での取り扱い

海中機器の寸法と重量は船上の取り扱いに大きな影響を与える。定電流／定電流給電方式の PBU と定電圧給電方式の NBU の寸法が大きくなりそうである。寸法と重量は必要とされる電力に依存することから、必要電力と水中機器の寸法と重量について、さらに検討を進める必要がある。

（5）サージ対策

光海底ケーブル通信システムの海底中継器内のサージ保護回路は単純で耐力があり、ARENA の定電流／定電流給電方式にも適応できると考えられる。回路はアレスタ、バリスタ、コンデンサなどのサージ吸収素子のみから構成される。一方、定電圧給電方式の場合には、さらに検討が必要である。

（6）エレクトロディング（EL）低周波数電流の重畳

EL はどちらの方式にも適用できると考えられる。

（7）効率と放熱

上述したように、定電流／定電流給電方式における PBU と定電圧給電方式における NBU が規模と放熱の点で問題となる。規模は必要電力に依存するので、さらに詳細な検討が必要である。

（8）負荷変動に対する応答

この問題は今後の検討課題であるが、双方のシステムで大きな差は見いだせないと予想される。

以上述べたように、双方の方式に利点と弱点がある。規模と寸法、重量、信頼性に関しては、定電流／定電流給電方式の PBU と定電圧給電方式の NBU に関して将来の課題が残されている。この問題は、必要電力も含めて、慎重に検討を続ける必要がある。

ケーブルの地絡障害とサージ保護に関しては、定電流／定電流給電方式が有利である。その他の項目に対しては大きな差がみられない。総合的に検討した結果、想定した条件の下では、定電流／定電流給電方式が最も有望であると考えられる。

3. 8 まとめ

本章ではまず交流給電方式の検討を行い、交流給電は伝送効率が低く、実用が困難であることを明確にした。

次に直流給電方式として、(a) 定電圧給電方式、(b)定電圧給電と定電流給電を併用した定電圧／定電流ハイブリッド給電方式、および(c)定電流給電から新たな定電流源を作り出す定電流／定電流給電方式を提案し、これらの比較検討を行った。

定電圧給電方式は、電力の分岐が容易であるという特徴を持っている。しかし、数 kV の高電圧から測定器などに使われる数十 V の直流電源を作る深海用の電源を実現した例はない。入力電圧を 3kV、DC/DC 変換器の最大入力電圧を 300V と仮定すると、10 台の DC/DC 変換器を直列に接続する必要がある。このことは NBU の信頼性を低下させるとともに、そのサイズと寸法を増加させる。

また、定電圧給電方式を実現するためには、海底ケーブルの障害に対する有効な対策を考案する必要がある。そこで、給電ワーキンググループでは定電圧給電方式に対応した NBU 内の電源の基本構成、海底ケーブルの障害に対する対策、PBU の基本構成を提案した。本構成によれば、障害区間を他の区間から切り離すことが可能となり、定電圧給電方式の最大の問題点が解決できる。また、陸揚げ局から近いノードから順番に給電を開始することも可能であるため、海底ケーブルの障害により万一全体システムの給電が停止した場合にも、正常区間の給電を行うことができる。しかし、提案した方法は比較的複雑であり、まだ確立されたものではない。実現するためにはさらに研究を進める必要がある。

定電圧／定電流ハイブリッド給電方式は、トランク 1 の給電を定電圧方式で行い、トランク 2 の給電を定電流方式で行うものである。この方式は給電の分岐が容易であるという定電圧給電方式の特徴と、海底ケーブル障害に強く、電子回路の海水からの絶縁が容易という定電流給電方式の特徴を組み合わせたものである。しかし、大規模な PBU が必要であること、各ノードの電源として定電圧給電方式用と定電流給電方式用の 2 種類の電源を開発する必要が生じ、開発コスト増大する問題がある。

定電流／定電流給電方式は、通信用海底ケーブルや従来の科学観測用海底ケーブルでも用いられている方式である。前述したように海底ケーブルの短絡障害に強く、電子回路の海水からの絶縁が容易であるという特徴を持っている。しかし、これまで定電流を効率よく分岐する技術が存在しなかった。そこで、本ワーキンググループでは新しい定電流／定電流変換器を提案した。また、そのプロトタイプを試作し、基礎的な実験を行った。さらに計算機シミュレーションを行った。これらの実験結果とシミュレーション結果は良好であった。定電流／定電流変換器の寸法、重量、信頼性等に関しては、今後さらに検討を続ける必要がある。

上記の 3 方式を比較した結果、定電流／定電流給電方式が想定した要求条件の下では最も高い可能性を持っていると考えられた。

このフィージビリティスタディで提案した方式は、これまでに例のないものである。今後さらにその動作の確認や信頼性や寸法、放熱等について検討を加える必要がある。また、スイッチング素子として、MOS-FET のほか、IGBT や GTO などの素子を検討する必要がある。さらに定電流／定電流給電方式に関しては、大電力化の検討も必要と考えている。

参考文献

- (1) H. Kirkham, V. Vorperian and B. Howe, "Parallel Power for Undersea Application : The Basic Consideration", SubOptic2001, 2001
- (2) H. Kirkham, B. M. Howe, V. Vorperian and P. Bowerman, "The Design of the NEPTUNE Power System", OCEANS 2001, 2001
- (3) K. Asakawa, J. Muramatsu, M. Aoyagi, K. Sasaki and K. Kawaguchi, "Feaility Study on Real-time Seafloor Glove Monitoring Cable Network - Power Feeding System -", Underwater Technology 2002, pp.116-122, 2002
- (4) K. Schneider, C. Liu, T. McGinnis and B. Howe, "Real-Time Control and Protection of the NEPTUNE Power System", OCEANS2002, pp.1799-1805, 2002
- (5) H. Kirkham, P. Lancaster, C-C Liu, M. El-Sharkawi and B. Howe, "The NEPTUNE power system: design from fundamentals", the 3rd International Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies, pp.301-306, 2003
- (6) Y. Shirasaki, T. Nishida, M. Yoshida, Y. Horiuchi, J. Muramatsu, M. Tamaya, K. Kawaguchi and K. Asakawa, "Proposal of Next-generation Real-time Seafloor Globe Monitoring Cable-network", OCEANS2002, pp.1688-1694, 2002
- (7) K. Asakawa, J. Muramatsu, J. Kojima, Y. Shirasaki et al., "Feasibility Study on Power Feeding System for Scientific Cable Newtwork ARENA", the 3rd International Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies, pp.307-312, 2003
- (8) K. Asakawa, J. Kojima, J. Muramatsu and T. Takada, "Novel Current toCurrent Converter for Mesh-like Scientific Underwater Cable Network - Concept and Preliminary TestResult -", OCEANS03, to be published, 2003