低周波ケーブル送電方式の提案

正員 舟木 剛 (大阪大学)

終身会員 松浦 慶士 (大阪大学)

Proposition of a Novel Low Frequency AC Power Cable Transmission System

Tsuyoshi Funaki, Member, Kenji Matsuura, Life Member (Osaka University)

This paper proposes a novel transmission concept of Low Frequency AC (LFAC) transmission system, which is suitable for a long distance and high power cable transmission. An HVdc system is conventionally adopted for a long distance power cable transmission by Oil Filled or Solid cables. An XLPE cable shows preferable performance as a power cable in the conventional AC system for relatively short distance transmission. But it has difficulty of operation in an HVdc system, for space charges accumulate in the insulating dielectrics under high dc electric field stress, and which may cause breakdown. A low frequency ac system can avoid this difficulty as a conventional utility frequency ac system does. In the proposed LFAC system, frequency converters are installed at the sending and receiving terminals. Then, the presented system is expected to control the power flow of the interconnection as an HVdc does. This paper shows the advantages and disadvantages of the presented LFAC system and its basic control strategy. They are confirmed through digital computer simulations using a simplified model.

キーワード：低周波，サイクロコンバータ，XLPE ケーブル，潮流制御，多端子

1. はじめに

近年の用地難や環境意識の高まりにともなって新たな送電鉄塔・架空送電線の建設は困難になっている。この問題は主たる需要地である都市区域において特に著しい。電力ケーブルによる地中送電は、線路自体のコストは架空線に比べ高くなるが、絶縁距離を短くできるため送電線路の占有面積が小さくなる、埋設設置することで周辺環境に対する影響が小さくなる、雷害等を考慮する必要がなくなる等の利点を持っている。このような背景から、架空線路に代わり電力ケーブルを用いた地中線路による送電が注目されている。都市区域における地中線路による送電は、500kV 送電線で 40km に至るものが建設されており⁽¹⁾⁽²⁾、都市化区域の拡大により今後さらに長距離の線路も必要となることが予想される。また海底ケーブルを含め、国際連系を考えた場合には 100km を超える線路が必要となる。従って地中線路に用いる電力ケーブルの大容量化・コンパクト化・臨界こう長の増大がケーブル送電採用の重要な鍵となっている。

直流送電は長距離大容量ケーブル送電を可能とする一つの解決手段であり、バルチック・フェノスカン等のプロジェクトでは数百 km にも及ぶ海底ケーブル送電が実現されている⁽³⁾。これらには油浸紙絶縁による OF ケー

ブルやソリッドケーブルが使用されている。一方、通常の交流送電では、絶縁油加圧装置等の付帯設備が不要で、加工・取扱い及びメンテナンスが容易かつ絶縁特性に優れた架橋ポリエチレン (XLPE) を絶縁体に用いた固体絶縁ケーブルが主流になっている。しかし、交流用に開発された XLPE ケーブルに直流電圧を印加した場合には絶縁体内に空間電荷が蓄積し絶縁破壊を引き起こす問題があるため、これをそのまま直流送電に用いることはできない。直流送電に対して固体絶縁ケーブルを適用することを目的として、空間電荷蓄積問題解決のためケーブル絶縁体の改良が鋭意行われているが、直流耐圧・インパルス耐圧を同時に満足し、長尺で均質な特性を持った絶縁材料は、まだ実用化には至っていない⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

一方、システム面からのアプローチとして、直流送電と異なる方式で同等の送電性能を持った XLPE ケーブル送電システムの新技術開発が考えられる。著者らはこの面からの問題の解決を図ることにした。すなわち、パワーエレクトロニクス機器の導入を前提とし、XLPE ケーブル固有の性質を考慮した新しいコンセプトの送電方式として低周波ケーブル送電方式を提案している⁽⁶⁾⁻⁽⁹⁾。

本稿ではまず提案方式である低周波ケーブル送電の基本概念について示すと共に、商用周波数による交流送電及び直流送電との比較を行う。次にケーブル線路の熱等

図1 低周波ケーブル送電の基本構成

Fig. 1. Basic configuration of the proposed LFAC cable transmission system

価回路とその周波数特性を用いて、提案方式による臨界こう長及び送電容量の増大効果を定量的に評価する。提案方式はパワーエレクトロニクス機器の導入を前提としているが、システムの能力を引き出すには機器の制御方式が重要であり、これについて提案・考察を行う。最後に簡略モデルを用いた潮流制御の計算機シミュレーションにより、提案方式の妥当性を検証する。

2. 低周波送電方式

〈2・1〉システム構成 図1に著者らが提案する低周波ケーブル送電システムの基本構成を示す。中央部に示す低周波部分の線路には交流仕様のXLPEケーブルを用いる。ケーブル線路は容量性回路であるため、低周波においても進相無効電力を発生する。但し無効電力の発生量は周波数に比例するため、通常用いられる商用周波数の場合に比べ周波数が低くなるほど無効電力の発生が小さくなる。

低周波ケーブル送電部の送・受電端は、直流送電と同様に電力変換装置を設け、各々商用周波数の交流系統に連系されており、この交流-低周波連系系統は同期連系・非同期連系の種別を問わない。直流送電では電力変換装置は交直変換器であるが、低周波ケーブル送電では周波数変換装置となる。

周波数変換装置については種々の方式が考えられる。自励式変換器のBTB接続による周波数変換は、出力制御性能及び高調波削減の面で優れているが、システム全体では直流送電の2倍のスイッチング素子を必要とし、損失・コストの面から不利となる。低周波送電線路が容量性であることから、他励式変換器のBTB接続による周波数変換も可能であるが、自励式直流送電と同様に一旦直流に変換する間接変換であるため不利となる。一方、交流-交流直接変換のサイクロコンバータを適用する場合には、自己消弧能力を持たない従来型のサイリスタを使用することができる。サイリスタを電源転流するために交流系統に転流電圧及び無効電力を供給する電圧源を必要とするが、交直変換器のBTB接続に比べ大容量の電力を低損失・低コストで変換することが可能である。

従って本論文では、周波数変換装置にサイクロコンバータを適用する方式を採用し、低周波ケーブル送電シス

テムの実現可能性について議論する。但しサイクロコンバータで歪みの少ない良好な低周波出力を得るには、出力周波数を電源周波数の $\frac{1}{3}$ 以下、つまり60Hz系統に対しては20Hz以下にする必要がある。

〈2・2〉低周波ケーブル送電方式の得失 低周波ケーブル送電システムでは、交流仕様のXLPEケーブルを用いる。提案方式と直流送電及び商用周波数の交流送電の得失を比較すると次のようになる。

- 油浸紙絶縁によるケーブルは交流・直流の両者において優れた絶縁性能を発揮し、低周波送電に対しても同様である。但しOFケーブルでは加圧装置等の付帯設備を必要とし、外傷による油流出等の危険があるため、電力ケーブルの主流は固体絶縁ケーブルに移行している。固体絶縁ケーブルは、メンテナンスが容易で誘電率や誘電体損も小さい。特に架橋ポリエチレン(XLPE)を用いたものは耐熱性にも優れている。一方、直流高電圧の使用に対しては絶縁体中に空間電荷が蓄積し絶縁破壊を引き起こす問題があり、交流仕様のXLPE絶縁体を直流送電に使用することはできない。通常のXLPE絶縁体中の空間電荷の蓄積現象に関しては、交流電圧を印加した場合0.1Hz以下では電荷蓄積が確認されるが、1Hz以上ならば中和されるという実験結果が報告されている⁽¹⁰⁾。また絶縁耐力はむしろ通常の商用周波数の交流に比べ低周波のほうが優れているとも報告されている^{(11)~(13)}。通常の交流仕様のXLPEケーブルを用いる低周波ケーブル送電線路を空間電荷蓄積が生じない周波数領域で運転することにより、商用周波数交流ケーブル線路の性能を上廻ることが期待できる。
- 交流送電ではケーブルの充電無効電流が大きく、ケーブルの熱容量から決まる臨界こう長(いかなる容量の分路リアクトルを接続しても負荷への送電が不可能となる線路長)が短い。また送電距離が長くなるに従い、大容量の両端リアクトル補償が必要となる。直流送電には無効電力に起因する臨界こう長の問題はない。低周波ケーブル送電では周波数を低くすることにより、ケーブル線路のサセプタンス成分が小さくなり充電無効電流が減少する。従って周波数に反比例して臨界こう長が長くなる。詳細についての検討は次章で行う。また両端リアクトル補償が不要もしくは大幅に削減され、パワーエレクトロニクス機器の機能として出力制御での無効電力補償を行うことも可能である。
- 既設の交流ケーブル線路の増容量化は、OFケーブルでは直流化することで可能であるがXLPEケーブルでは前述の理由のため直流化は不可能である。低周波ケーブル送電では線路電流における充電無効電流の占める割合が減少するため、有効電流を大きくとることができ伝送有効電力が増大する。従って低周波ケーブル送電方式は交流仕様の既設XLPEケー

ブル線路の増容量対策としても適用可能である。

- 多端子接続した送電線の端子分離や、事故電流遮断には遮断器が必要である。直流送電では交流のような周期的な電流零点がないため、常時損失のない機械式の遮断器が適用できない。直流送電では直流遮断器がなくとも線路事故の場合は変換器制御による高速な事故電流抑制が可能であるが、多端子系統における無停電の端子分離ができない。低周波ケーブル送電では、商用周波数の交流送電に比べ時間間隔は長くなるものの電流零点が存在するため、機械式遮断器の適用が可能であり、通常の交流送電と同じように並列多端子接続が容易である。低周波化することで $\frac{d\omega}{dt}$ が小さくなるため、遮断器の遮断性能は向上する。線路事故に対しては、周波数変換装置の制御により直流送電と同じ高速な事故電流抑制が可能である。
- 直流送電では送受電端間の電圧差により潮流が決まり、これを変換器により高速に制御することが可能である。低周波送電では、商用周波数の交流送電と同様に送・受電端間の電圧差・位相差で潮流が決まる。送・受電端の周波数変換装置の低周波出力電圧位相・振幅を協調して制御することにより高速な潮流制御が可能である。この潮流制御方式については4章で検討する。
- 低周波送電の3相平衡状態では回線あたりの有効電力は一定である。3相3線式送電線路一条あたりの輸送能力は導体帰路方式の直流送電に比べ実効値ベースで1.15倍である。シース・外装損失を考えなければ、ケーブル静電容量による無効電力が定格有効電力の0.57puより小さい場合において、直流送電の輸送能力をやや上回る。

3. ケーブル線路の低周波送電特性

ケーブル送電では絶縁体の絶縁耐力を劣化させないために、最高許容温度以下で運転する必要がある。ケーブル線路における温度上昇の原因は線路損失であり、これには線路の静電容量に対する充電電流が大きく影響する。特に電力ケーブルを地中埋設すると、架空線送電で用いられる裸電線に比べて熱放散性が極めて悪いので、交流送電の定態安定度で決まる限界距離に対して臨界こう長がかなり短いものとなる。本章では提案する低周波送電方式での充電電流低減による、ケーブル送電の臨界こう長及び送電容量の増大効果について定量的評価を行う。

受電端の負荷力率:1, 無効電力補償なしの場合における伝送有効電力 (P_R) と線路こう長 (l) の関係は (1) 式で表される⁽¹⁴⁾。

$$P_R = \sqrt{S_{th}^2 - (2\pi f C l E^2)^2} \dots\dots\dots (1)$$

但し、 C :単位長当たりの静電容量、 E :線間電圧、 S_{th} :図2に示す電力ケーブルの熱等価回路から求まる常時許容

図2 ケーブル熱等価回路

Fig. 2. Thermal equivalent circuit of a power cable

図3 XLPE ケーブル構造

Fig. 3. Configuration of XLPE power cable

表1 XLPE ケーブルの設計寸法

Table 1. Design parameters of XLPE cables

	66kV	154kV	275kV	500kV
d_1 (mm)	53.8	53.8	53.8	53.8
d_2 (mm)	79.8	93.8	106.8	114.8
d_3 (mm)	84.2	105.8	118.8	127.2
d_4 (mm)	93.2	115.8	129.8	139.2
d_5 (m)	0.081	0.096	0.110	0.117
d_1' (mm)	57.8	57.8	58.8	58.8
d_2' (mm)	77.8	91.8	104.8	112.8

但し、交流導体抵抗 (2000mm^2) $=0.0164\text{m}\Omega/\text{m}$ 、シース損失率 (3 条巻積み) $=0.02$ (66kV), 0.6 (154kV 以上)、 $\tan \delta=0.0005$ (77,154kV), 0.0003 (275, 500kV)、 $\epsilon=2.3$ 、 $R_1 = \frac{\rho_1}{2\pi} \ln \frac{d_2}{d_1}$ 、 $R_2 = \frac{\rho_2}{2\pi} \ln \frac{d_4}{d_3}$ 、 $R_3 = \frac{3\rho_s}{\pi d_5}$ 、 $R_3' = \frac{\rho_s'}{\pi d_1}$ 、 ρ_1 (絶縁体固有熱抵抗率) $=3.5[\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}]$ 、 ρ_2 (防食層固有熱抵抗率) $=5.5[\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}]$ 、 ρ_s (表面放散固有熱抵抗率) $=0.09[\text{K}\cdot\text{m}^2/\text{W}]$ 、 ρ_s' (実効コア表面放散固有熱抵抗率) $=0.072[\text{K}\cdot\text{m}^2/\text{W}]$ 。

電流によって決定されるケーブル線路の熱定格容量 (三相分)。

図3の構造で、表1に示した設計値を持つ各電圧階級の地中送電用 XLPE ケーブルに対して、線路こう長に対するケーブルの伝送有効電力を、送電周波数をパラメータとして求めた結果を図4に示す。送電こう長が短ければケーブル線路の静電容量が小さく、送電周波数に関わらず充電電流が殆ど流れないため、電流容量の限界付近まで有効電力に利用できる。各々66kV:196MW/回線、154kV:419MW/回線、275kV:754MW/回線、500kV:1359MW/回線 が60HzにおけるXLPEケーブルの熱容量限界で決まる短距離送電容量となっている。但し、電圧階級が高い程ケーブルサイズも大きくなることから熱放散性が悪くなり、同じ導体サイズでも電流容量が小さくなるため、送電容量

図4 伝送有効電力に与える送電こう長の影響

Fig. 4. Transmissible power vs. cable length

図5 送電容量の周波数特性

Fig. 5. Transmissible power vs. frequency

は電圧に比例しない。低周波化による常時許容電流の増大効果は僅かであり、図5に示すように送電こう長10km程度の短距離送電では、電圧階級に関わらず低周波化しても送電容量は殆ど変化しない。

図4に示すように、電圧階級が高いほど線路こう長による送電容量の減少が著しい。60Hz商用周波数の交流送電において66kVでは100kmの送電こう長でも送電容量を95%以上確保でき、145kmで導体帰路の直流送電と同容量の87%($=1/1.15$)となる。154kVになると100kmでは送電容量は80%に低下し、さらに275kVでは50%まで低下するため電圧階級が低い154kVと同容量程度しか送電容量を確保することができない。500kVでは100kmの送電は不可能であり、これを実現するには中間電気所を設置し、無効電力補償を行う必要がある。但し、50km程度での送電でも500kVでは70%の送電容量しか確保することはできないため、さらに送電容量を大きくするには多数の中間電気所を必要とする。中間電気所を用いなくて500kVで100kmを送電するには、図5に示すように少なくとも45Hz以下にすることが必要であり、23Hz以下とすることで87%以上の送電容量が確保される。

以上のように、低い電圧階級では実用的な送電距離での低周波化による効果は少ないが、275kV、500kVの高電圧階級では長距離送電において低周波化がもたらす送電容量増大効果は大きく、中間電気所による無効電力補

償を必要としなくなり、特に設置が不可能な海底ケーブル等で効果を発揮するものと考えられる。10Hz以下の周波数を選ぶことで、直流送電と同等の数百kmの長距離ケーブル送電も可能となる。

500kVの大容量交流地中送電では送電こう長40km程度のものが建設中であり⁽¹⁾⁽²⁾、今後さらに長距離の線路も必要とされる可能性がある。上述の送電こう長と送電容量の関係から、低周波送電方式はこのような高い電圧階級での長距離・大容量ケーブル送電に適した方式であるといえる。

4. 低周波ケーブル送電の制御

〈4・1〉周波数変換装置 本稿では低周波ケーブル送電における周波数変換装置として、商用周波数の交流から低周波数の交流に直接変換するサイクロコンバータを採り上げ検討する。

サイクロコンバータは出力側に対して、正極性の電流を流す正群コンバータと、負極性の電流を流す負群コンバータから構成される。この正・負群コンバータの動作方式により循環電流方式と、非循環電流方式に分けられる。循環電流方式は出力電流の極性に関わらず常に正・負群のコンバータを動作状態にするため、常時正・負群間を循環電流が流れ、これが過電流とならないよう制限するリアクトルを必要とする。非循環電流方式は出力電流の極性に依りて正群及び負群コンバータのうち一方のみを動作させる方式であり、必要な負荷電流のみ出力し循環電流を生じない。従って循環電流抑制リアクトルを必要とせず、装置の小型化が可能である⁽¹⁵⁾。

循環電流方式は出力電圧の高調波が少なく、出力電流零点付近での電流変動を生じない利点を持っているが、入力側の力率が低いために総合効率が低下する点及び、低周波ケーブル送電のような大電流を扱う装置では循環電流抑制リアクトルのサイズが大きくなる点が問題となる。非循環電流方式は出力電流零点付近でのコンバータの正・負群の切換えにデッドタイムが必要なために、出力電流の高調波が多くなる欠点を持つ。しかし装置の小型化が可能で、入力力率が低下しないため総合効率が高くなることから、低周波ケーブル送電におけるサイクロコンバータではより現実的な運転方式と考えられる。

電圧の昇降圧に関しては、商用周波数・低周波数の交流共に変圧器の利用が可能である。但し低周波数では変圧器が大型化すると同時に効率も低下するので、直流送電と同様に変換器の商用周波数交流系統側にのみ変圧器を適用するものとする。

〈4・2〉低周波系の基準位相・周波数設定 本節では低周波ケーブル送電において、潮流制御に必要な低周波交流系の基準位相・周波数設定方式について検討する。

直流には位相及び周波数がなく、直流送電では送受電端子間の電圧差と線路抵抗から決まる線路電流と、線路電圧の積によって有効電力潮流が決まり、無効電力を考

図6 基準位相・周波数設定方式

Fig. 6. Phase and frequency reference establishment

慮する必要がない。潮流反転は他励式では電圧の極性反転，自励式では電流の向きを変えることにより行う。これらの潮流制御は，交直変換器の特性により高速に動作させることが可能である。

交流では電圧・電流に位相・周波数があり，このため電力も有効電力と無効電力の二つを同時に考慮しなければならない。通常の交流システムの位相と周波数は(2)式に示した発電機の動揺方程式によって決まる回転子の位置と回転速度に支配されている。

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} + D \frac{d\delta}{dt} = P_m - P_e \quad (2)$$

但し， M :発電機慣性定数， D :制動係数， δ :回転子角， P_m :機械入力， P_e :電気出力

各発電機間の同期化力により同期を保つことで，発電機の安定運転が保証される。半導体電力変換器を用いたFACTS機器を導入した場合においても，これらの機器動作の基準となるのは発電機出力電圧の位相及び周波数であり，FACTS機器自身は位相・周波数の基準とはならない。潮流計算等において無限大母線を考えない場合では，基準とすべき位相がないために各端子において絶対位相は定義できず，端子間の相対位相のみが決まる。このようなシステムの潮流計算を行うには，計算の簡略化のため基準位相となるスラックノードを設けることが必要である。基準位相を設けたほうが潮流計算が簡略化されることはすなわち，基準となる絶対位相を定義することで潮流制御を容易にすることを示している。発電機を直接接続しない低周波送電システムの位相・周波数は動揺方程式により支配されず任意に設定可能である。従って低周波送電方式では低周波系の基準位相を設定することを考える。このとき低周波系の全端子を基準周波数で動作させるという制約を加えれば，同期安定度の問題は発生しない。

低周波系の基準位相・周波数設定方式について考えられる構成を図6に示す。図6(a)に示す方式Aでは，一方の端子が親端子として基準位相・周波数を生成し，他方の端子は子端子としてこれに従って運転する。図6(b)

に示す方式Bでは，全ての端子を共通の基準位相・周波数に従って運転する。

方式Aでは親端子が基準信号に従い低周波数交流を出力する。子端子は低周波側連系点での低周波電圧の検出位相に伴って自端子の低周波数交流を出力させる。従って子端子の起動に先立ち親端子を起動し，低周波電圧を確立しておく必要がある。この方式は各端子の分散制御に適用可能であるが，位相検出を行うPLL方式等は検出時間遅れを伴う。低周波の3サイクルで位相検出が完全に追従するとしても，商用周波数に対しては周波数の変換比を掛けたサイクル数になるため，追従に要する時間は低周波になるほど長くなる。指令値変更等の過渡時には端子電圧の位相変化が伴うため，制御性が悪くなることが考えられる。

方式Bでは基準位相・周波数の設定に，各端子で高精度の同期クロックを用いる。高精度の同期クロックとしては測位衛星を用いたGPS (Global Positioning System) 時計や，次世代高性能リレーシステムで用いられるSDH (Synchronous Digital Hierarchy) 方式が適用可能である。これらはサブ μsec 級の同期精度の実力を備えており，基準位相・周波数としての使用に耐えうるものである。但し，GPS時計では衛星の捕捉情報喪失やシステムの不安定を生じることがあり，電力系統における機器制御系に適用するには信頼性に欠ける。一方SDH方式は電力系統の保護システムであるリレー情報と同じクロック信号を用いるため，信頼性及び電力系統と機器制御系の整合性の面で優れた同期方式であるといえる。本方式は個々に基準位相・周波数を持ち，これらが高精度で同期しているため検出遅れがなく簡便であり，多端子間の分散制御に適するものと考えられる。この基準位相を基に，各端子における低周波数交流電圧・電流位相を変換器により制御し，有効・無効電力潮流を任意の値に設定することが可能である。

〈4・3〉 端子制御 図7に低周波ケーブル送電システムの低周波側の端子出力電力円線図を示す。ケーブル線路は直列成分であるインダクタンス及び抵抗が小さく，並列成分である静電容量が大きい。このため端子電圧を一定とした場合，ほぼ無効電力(Q)一定の横線上を出力点が移動することになる。また同図における半円の半径は，前章で求めたケーブルの熱定格から定められる最大電流より算出される最大皮相電力である。60Hzでは有効電力(P)の可制御範囲が小さいが，低周波化することで無効電力の発生が減少するため熱定格に対して最大有効電力が大きくなり， P の可制御範囲が拡大する。

図6の送電端子から受電端子への二端子送電を考えた場合，線路抵抗が無視できるとすると，送受電端電圧が同じであれば両端の位相差により有効電力潮流が決まる。低周波出力端子電圧の位相差制御については，基準位相に対して送・受電両端子の位相を同時に変化させる方法と，一方の位相を固定し他方の位相のみ変化させる二つ

図7 低周波系の端子出力電力
Fig. 7. Output power of LFAC system

図8 低周波ケーブル送電の端子制御方式
Fig. 8. Terminal control of LFAC system

の方法が考えられる。後者の方が制御系の構成が簡素になるため、本論文ではこれを図8に示す低周波ケーブル送電システムの端子制御系として次節の検討に用いる。送電端側では図8(a)に示すようにサイクロコンバータの出力低周波電圧位相を基準位相($\delta_s = 0$)で一定とする。受電端側は有効電力制御(APR)がサイクロコンバータの出力低周波電圧の位相(δ_r)を変化させて潮流を制御する。この動作点は図8の δ - P 特性から決まる。これにサイクロコンバータの出力低周波電圧の振幅制御による無効電力制御(AQR)を加えることで、ケーブル線路の熱容量限界以下での運転を可能とする。

〈4・4〉シミュレーション 表1で設計値を示した500kV XLPE ケーブルを用いた低周波(10Hz)、送電距離100kmの低周波ケーブル送電における潮流制御シミュレーション結果を図9に示す。サイクロコンバータの低周波端子出力はフィルタ用低周波ACリアクトル($X=3\%$)の背後電圧とした簡略化モデルで表し、電圧・電流諸量を10Hzベースの実効値で扱い、計算刻みは1msecとした。サイクロコンバータの制御応答の遅れ及び検出系の遅れを考慮して、送・受電端両側のAQR制御は時定数0.3(sec)の一次遅れ系とし、出力電圧振幅値を変化させている。受電端のAPR制御は時定数0.3(sec)の一次遅れ系とし、低周波出力電圧の位相角を方式AではPLLの検出位相に対して変化させ、方式Bでは送電端と同じ基準位相に対して変化させる。なお方式AのPLLは3サイクル程度で追従するとして時定数0.3(sec)の一次遅れを介して受電端電圧位相を検出位相として出力させる。

図9 潮流指令値変更の応答
Fig. 9. Response to a power flow change

図9のシミュレーション結果は $T=0.1$ (sec)の時点で、受電端側APRの潮流指令値を $0 \rightarrow 1$ (p.u.)にステップ状に変化させたものである。方式Bでは $T=0.55$ (sec)の時点で潮流が指令値に追従するが、方式AではPLLの位相追従遅れを考慮しているため、指令値に対する追従が悪化しており $T=0.8$ (sec)までかかっている。APRによる低周波出力有効電力の変化に影響を受け、過渡的に無効電力出力が変動し、特に有効電力の追従特性が良い方式Bで大きく表れる。これは、本検討ではサイクロコンバータ出力を電圧源として扱い、AQR・APRで各々振幅と位相を別個に制御しているため、両者の間で干渉を生じ無効電力変動となり現れたものと考えられる。

サイクロコンバータの低周波出力電圧の応答を低周波1サイクル以下にまで高速化することは可能であるが、正確な低周波電圧位相情報が必要であると共に、図8の制御系ではAPRとAQRの相互干渉が大きくなるため、サイクロコンバータの低周波出力電圧の振幅・位相同時制御による有効・無効電力出力の非干渉化が低周波送電の制御応答の改善に必須である。方式AではPLLの追従遅れが制御出力応答を悪化させるが、追従に必要な数サイクルが低周波であるために時間的に長く、半導体電力変換装置を用いた高速な電力制御の能力を十分に発揮させることが難しい。また受電端位相とPLL検出値より、送・受電端の位相差が最大でも2度であることを考えると、PLLも高検出精度が要求され、出力高調波の大きい低周波端子での実現は困難であることが予想される。従ってPLLの追従遅れによる制御応答と基準位相の取得の点から、方式Bに低周波有効・無効電力出力非干渉制御を適用することが、提案システムを実現する上で必要

であると考えられる。

5. むすび

XLPE ケーブルは保守・取扱いの容易な固体絶縁ケーブルであり、交流送電用としては優れた絶縁性能を持っている。しかし電力ケーブルによる送電は線路の充電電流が送電距離に比例して増大するため、架空線送電に比べて送電可能限界距離が短く、特に電圧階級が高いほど短くなる問題があった。また OF ケーブル等では直流化による送電距離の延長も可能であるが、油槽や加圧装置などの付属設備が必要となる。XLPE ケーブルの場合は直流高電圧印加の下で絶縁体内に空間電荷が蓄積し、絶縁破壊を引き起こすという問題があるため交流仕様のケーブルを直流に適用することはできない。著者らが提案した低周波ケーブル送電システムは、空間電荷蓄積問題を解消し且つ、ケーブル送電の臨界こう長を増大する方式である。具体的な XLPE ケーブルの設計例をもとに送電限界距離を試算した結果、66kV 及び 154kV の電圧階級では提案方式の実用上の効果は小さいが、275kV 及び 500kV の超高圧階級では実用的な効果を見出すことができた。すなわち交流送電では実用上 500kV では 50km が地中線送電の距離限界であったものが、提案方式によると 100km 以上の送電を可能とし、空間電荷を蓄積しない周波数の下限では、実用上直流送電と同程度の臨界こう長となる。

商用周波数の交流から低周波への変換には、直流送電等で実績のあるサイリスタパルプを使用したサイクロコンバータが適用可能である。装置規模としては直流送電より大きくなる反面、低周波といえども電流零点があるため交流用の遮断器が適用可能であり、多端子構成が容易になる。また低周波の位相・周波数は通常の交流系統とは異なり、発電機に支配されないため任意に設定可能である。この特徴を利用し、基準位相の設定を用いた端子制御方式を提案した。基準位相を用いた端子制御を二端子システムに適用し、本方式による潮流制御特性についてシミュレーションで検討した結果、PLL を用いて検出した低周波電圧位相に従って、有効・無効電力出力の干渉を考慮しない制御系でシステムを構成した場合は変換器を適用したことによる高速制御特性を発揮することができないことが判明した。従って、高精度同期クロックによる位相設定とサイクロコンバータの低周波有効・無効電力出力非干渉制御の実現が、提案システムを適用する上での開発課題である。本論文の潮流制御のシミュレーションではサイクロコンバータを電圧源として扱ったが、より詳細な解析を行う場合には、動特性を十分に考慮したモデルによる検討が必要である。多端子化した場合の端子制御方法についても検討する必要がある。これらについては稿を改めて報告する。

(平成 11 年 12 月 6 日受付, 同 12 年 2 月 7 日再受付)

文 献

- (1) 岡田他:"最近の超高圧 CV ケーブル線路の技術動向", 平 10 電学全大, S32-1
- (2) 大野他:"社会の動脈としての電力ケーブル技術", 電学誌, Vol.118, No.7/8, pp.430-433(1998)
- (3) 畑, 広瀬:"直流ケーブル技術の現状と開発動向", 平 9 電学全大, S23-5
- (4) 寺島他:"500kV 直流 CV ケーブルの開発", 電学 B 大, Vol.2, 391(1998)
- (5) 寺島他:"直流 CV ケーブル絶縁設計手法に関する一考察", 電学論 B, Vol.119-B, No.2, pp.212-222(1999)
- (6) 松浦:"大容量ケーブル送電技術の展望", 電気評論, 83 巻, 10 号, pp.12-17(平 10)
- (7) 舟木他:"低周波送電方式の基礎検討", 平 11 電学全大, No.1509
- (8) 舟木他:"低周波送電方式の基礎検討(その 2)", 平 11 電学 B 大, No.247
- (9) 舟木他:"低周波送電方式の提案と出力特性解析", 電技研資, PE99-46(1999 年 9 月)
- (10) T.Takada et. al.:"New Direct Observation Technique for Electric Charge Behavior in Insulating Materials and Its Application to Power Cables", Proc. CIGRE, 15-303(1998)
- (11) 内田他:"ホトリの新検出方法に関する基礎研究(1)", 平 9 電学全大, No.1860
- (12) 内田他:"ホトリの新検出方法に関する基礎研究(2)", 平 10 電学全大, No.1710
- (13) 内田他:"CV ケーブルの新しい現地耐圧試験法の有効性に関する研究", 電学論 B, Vol.115-B, No.10, pp.1140-1147(1995)
- (14) 関根編著:"送配電工学", 平 1, オーム社
- (15) B.R. Pelly, 西條訳:"サイクロコンバータ", 昭 51, 電気書院
- (16) 芹澤他:"時刻同期と広帯域通信を用いた広域保護システムの一構成法", 電学論 B, Vol.119-B, No.8/9, pp.916-922(1999)

舟 木 剛 (正員) 昭和 44 年 2 月 12 日生。平成 5 年 3 月大阪大学大学院工学研究科博士前期課程修了。平成 5 年 4 月同大学院博士後期課程入学。平成 6 年 4 月より大阪大学工学部電気工学科助手。主に直流送電とパワーエレクトロニクス応用に関する研究に従事。IEEE, 電子情報通信学会, 日本大気電気学会, パワーエレクトロニクス研究会会員。

松 浦 虔 士 (終身会員) 昭和 13 年 1 月 1 日生。昭和 37 年 3 月大阪大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年 4 月住友電気工業(株)入社。昭和 52 年 1 月大阪大学工学部電気工学科助教授。昭和 63 年 3 月同教授。工学博士。電気エネルギーの発生・伝送・変換・制御に関する研究に従事。エネルギー資源学会会員。