交直並列送電連系が交流電圧安定性に及ぼす影響

正員 多田 泰之 (東京電力)

正員 横山 明彦 (東京大)

正員 関根 泰次 (東京大)

The Influence of AC-DC Parallel Interconnection on
Voltage Stability of AC SystemYasuyuki Tada, Member (TEPCO), Akihiko Yokoyama, Member, Yasuji Sekine, Member
(University of Tokyo)

In a contemporary bulk power system, the voltage instability phenomenon caused by insufficient power supply capability to load of constant power type is becoming an important problem. On the other hand, the increase of the short circuit capacity of power system is also becoming a serious problem, which may deteriorate the voltage stability.

In this paper, the static and dynamic characteristics of power supply to each load in hybrid AC-DC power system are analyzed by using static and transient $P-V$ curves respectively. In this analysis three kinds of DC transmission system control schemes are compared.

It is made clear that the DC transmission system has an advantage of increasing power supply capability at an inverter node. Also made clear is that constant firing angle-constant current control makes it possible to provide the inverter node with a larger power than the two conventional control methods, such as constant current-constant voltage control and constant power-constant extinction angle control methods. Transient digital simulations show that the DC interconnection improves the voltage stability under opening of DC interconnected line or one-line opening of AC double-circuit interconnected lines.

キーワード：電力系統，直流送電，電圧安定度， $P-V$ 曲線

1. はじめに

直流送電はその特徴から，長距離大電力送電，海底ケーブル送電，異周波連系，短絡容量抑制などの目的で各国で適用されている。近年，日本の電力系統は，比較的短距離の送電線がループ構成をするに至り，短絡容量の増大が大きな問題になりつつある。更に，系統の供給可能電力と負荷の要求電力の不均衡を主原因とする電圧不安定現象が発生し，負荷の特性，系統の供給能力の特性，の両面から精力的に研究が行われている⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁵⁾。

この電圧安定性を改善するためには，系統の電力供給能力を向上させることが必要で送電線設備を増強す

ればよいが，前述の短絡容量増大の問題が発生してしまう。送電線を増強せずに供給能力を向上させる方法には，電力用コンデンサが有効であることがよく知られているが，これにも電力所数地の制限，低周波共振の発生などの問題があるので限界がある。

本論文では，直流送電には電力輸送中の無効電力損失がないという点に注目し，通常の交流系統に直流送電線を付加することによる系統の電力供給能力の改善効果を，モデル系統を用いて静的および動的な電力供給特性を調べることによって基礎的な検討を行う。

2. 静的供給電力特性の検討

<2・1> 静的電圧安定性と静的 $P-V$ 曲線 電圧

不定性は負荷の要求する有効、無効電力を系統の電力輸送設備の不備から満足に供給できない場合に発生する。ここでは、負荷の動きに比較して系統の無効電力制御が著しく速いとして、直流送電を組込んだ電力系統の電力供給特性を調べ、その結果を基に直流送電を組込んだ電力系統の静的電圧安定性を議論する。そのために、本論文では電力系統の供給最大電力および供給電力と電圧の関係が明確になる静的 P - V 曲線を利用する。

〈2・2〉 静的 P - V 曲線の定義および計算手法

静的 P - V 曲線の定義は様々であるが、本論文では交直変換器が消費する無効電力の静的電力供給特性への影響を明確にするため、次に示す定義を用いる。注目ノードの静的 P - V 曲線とは、注目ノード以外のノードでは指定値（発電機ノードは P, V 指定、負荷ノードは P, Q 指定）に固定すると共に、かつ注目ノードの無効電力 Q を指定値に固定した状態で、注目ノードの P と V の関係を描いたものであるとする。

通常、静的 P - V 曲線は、潮流多根計算法を用いて描く。直流送電を含んでいる場合の潮流計算も、直流系統の制御方式が変化しない領域では普通の潮流計算

法に若干の改良を加えることで行うことができる⁽³⁾。しかし直流送電では、電圧の大きさにより変換器制御方式が変化するため、制御方式が切替わる動作点近傍ではほとんど計算が収束しない。

そこで、制御方式が切替わる動作点付近の静的 P - V 曲線を求めるために、本論文では図1に示すような計算手法を考案し、これを基に静的 P - V 曲線を描くことにする。この計算手法の特徴は、アドミタンス行列を用いて回路計算により直接ノード電圧を決定することにある。具体的には、注目ノードの等価コンダクタンスを徐々に増加させ、注目ノードの消費電力を徐々に大きくする。非注目負荷ノードでは一回の繰返し計算中の電圧変化は大きくないとして（大きくならないように等価コンダクタンスの増加を決定する）、 N 回目のノード電圧 $V_K^{(N)}$ と指定値 $P_k + jQ_k$ を用いて $(N+1)$ 回目の計算に用いる等価アドミタンス $Y_K^{(N+1)}$ を決定する。注目ノードの等価サセプタンスも同様である。直流送電変換器等価アドミタンスの決定は、 N 回目の交直変換器ノード電圧 $V_{dc}^{(N)}$ と直流制御特性を考慮し $(N+1)$ 回目の制御角 $\alpha^{(N+1)}$ および制御進み角 $\beta^{(N+1)}$ を決定し交直変換器の等価アドミタンスを計算

図1 静的 P - V 曲線の計算法
Fig. 1. Flowchart of static P - V curve.

する。一方、スイングノード以外の発電機ノードは、 P と V の指定値から等価コンダクタンスを決定し、等価サセプタンスについては適当な初期値を与える。

各ノードの対地等価アドミタンスと系統のアドミタンス係数行列とスイングノードを用いて各ノード電圧を計算し、各発電機ノードの電圧の大きさが指定値に十分近ければ次のステップに、偏差が大きい場合は、発電機ノードの等価サセプタンスを調整し電圧の大きさが収束するまで計算を繰返す。この方法によれば、直流送電変換器のように電圧により特性が変化する機器を交流系統に組込んだ場合の静的 P - V 曲線を容易に求めることができる。

図2 モデル系統
Fig. 2. Model system.

〈2・3〉 直流制御方式による静的 P - V 曲線の比較

従来からある定電流・定電圧制御、定電力・定余裕角制御の制御方式⁽⁶⁾と、今回新たに提案する定遅れ制御角(α)・定電流制御で制御を行う直流送電システムを、図2のモデル系統のように組込んだ場合と直流送電システムを組込まない場合の静的電力供給特性を静的 P - V 曲線を比較することで検討する。ただし、交流系統の諸定数、負荷ノードの無効電力指定は図2(a)の系統図どおり、非注目負荷ノードの有効電力指定を1.0 puとし、直流系制御設定値は表1に示す。

(1) 順変換器ノード

(i) 変換器変圧器のタップを固定した場合 順

表1 制御設定値
Table 1. Setting value of AC-DC converter.

制御方式	順変換器設定	逆変換器設定
定遅れ制御角(α)・定電流制御	15°	0.9
定電流・定電圧制御	0.9	1.0
定電力・定余裕角(γ)制御	0.9	25°

$\gamma_{\min} = 10^\circ$, $\alpha_{\min} = 15^\circ$

*制御設定値は最大電流が0.9 pu程度になるように決定した。

(a) タップ固定

(b) タップ制御

図3 静的 P - V 曲線(順変換器ノード3)
Fig. 3. Static P - V curves (node 3).

逆両変換器変圧器のタップを1.0に固定した場合の静的 $P-V$ 曲線を図3(a)に示す。直流系統がない場合に比較して、直流系統がある場合は直流送電をどのように制御しても最大供給電力が小さくなってしまふ。つまり、変換器無効電力消費による悪影響が現れている。また、定電流・定電圧制御、定電力・定余裕角制御は電圧の低下に伴い制御方式が変化する。

(ii) 変換器変圧器のタップを制御する場合 順両変換器変圧器のタップが無限に大きい調整幅をもつものとして、交直変換器の入力電圧が常に1.0 pu になるようにした場合の静的 $P-V$ 曲線が図3(b)である。この場合も、直流送電を組込むことにより最大供給電力が減少することには変わりがないが、変換器電圧の変化がないために直流送電の制御方式の移行はない。また、変換器での無効電力消費が少ない順に最大供給電力が大きくなっている。

(2) 逆変換器ノード

(i) 変換器変圧器のタップを固定した場合 条件は順変換器ノードと同じである。図4(a)に静的 $P-V$ 曲線を示す。順変換器ノードと違い、直流送電を

(a) タップ固定

(b) タップ制御

図4 静的 $P-V$ 曲線 (逆変換器ノード4)

Fig. 4. Static $P-V$ curves (node 4).

組込むことにより最大供給電力が大きくなる。この場合も、定電流・定電圧制御、定電力・定余裕角制御で電圧の低下に伴い制御方式の移行が起きている。順変換器ノードの場合、直流送電を付加することで、順変換器での無効電力消費が大きく影響し、直流送電による交流連系統の無効電力損失の低減の効果がなかったのに対し、逆変換器側では交流連系統を輸送経路としない有効電力が送られてくるために、逆変換器の無効電力消費増という悪影響があっても系統の供給能力は増加する。また、最大供給電力の制御方式による差はほとんどないが、定 α ・定電流制御が、無効電力の消費が少ないため、最も電圧を高く保つことができる。

更に、直流送電が付加された場合の静的 $P-V$ 曲線の供給電力の小さい部分での傾きが、通常の $P-V$ 曲線の場合と逆に正となり、通常の $P-V$ 曲線下側部分と同じになっている。この領域は、直流送電によって輸送された有効電力が逆変換器設置ノードで消費されるだけでなく、交流系統に流入するために現れる。この部分については、静的な解析だけでは十分に検討できないので動的解析を行うときにも触れる。

(ii) 変換器変圧器のタップを制御する場合 図4(b)に静的 $P-V$ 曲線を示す。直流送電による最大供給電力の増加がここにも明確に出ているが、タップを固定したときとは違い、制御方式により最大供給電力に差が現れ、タップ制御なしのときと比較すると定電力・定余裕角制御では最大供給電力はほとんど変化せず、定電流・定電圧制御では減少し、定 α ・定電流制御方式では増加している。これは、両変換器の無効電力消費および直流送電電力の関係から説明される。

定電力・定余裕角制御は両変換器での無効電力の消費が、他の制御方式に比較して少なく、かつ両変換器入力電圧の大きさに対して無効電力消費の変化の割合が小さい。また、直流送電電力が一定であるため系統の最大供給電力はタップ制御にほとんど影響されない。一方、定電流・定電圧制御は変換器入力電圧の降下に伴い両変換器での無効電力の消費が減少するという性質がある。そのため、変換器入力電圧を一定にするタップ制御を行うと、無効電力消費の減少が現れなくなり、最大供給電力は減少する。定 α ・定電流制御方式も逆変換器入力電圧の降下に伴い無効電力消費が減少するがその量はわずかで、逆に順変換器入力電圧の降下に伴い直流送電電力が減少してしまう。そのため、変換器入力電圧を一定にするタップ操作を行うことにより直流送電電力の輸送量の低減を防ぐことができ最大供給電力が増加するのである。

〈2・4〉 静的に見て有利な制御方式 〈2・3〉節で得

図 5 タップ値をパラメータとした静的 $P-V$ 曲線
Fig. 5. Static $P-V$ curves with different tap values.

られた結果は、順変換器設置ノードの電力消費が比較的一定で、逆変換器設置ノードの電力消費が大きくなるような場合には、系統全体の静的供給電力を短絡容量の増加なしに改善できることを意味する。そこで、系統全体の静的電力供給特性を最も良く改善できる直流送電制御方式を逆変換器設置ノードの電力供給特性改善という視点から、図 4 (a), (b)を用いて検討する。

最大供給電力は、タップを固定した場合、わずかながら、定 α ・定電流制御が最も大きく、タップを制御したときは明らかに定 α ・定電流制御が大きい。また、供給電力に対する電圧の大きさも定 α ・定電流が大きい。従って、本論文で取上げた直流送電制御方式では、定 α ・定電流制御が静的電力供給特性を最も向上させることができる。

更に、変圧器のタップが有限であることを考慮し、定 α ・定電流制御を最も有効に活用できるタップ設定値を計算したのが図 5 である。図より明らかなように、順変換器ではタップを大きくし、逆変換器では小さくすると電力供給特性が改善されている。これは、次のように説明される。順変換器入力電圧を大きくすることにより順変換器直流電圧が大きくなり、逆変換器では直流電流を設定値に保つため直流電圧を大きくしなければならない。そのために、逆変換器では進み制御角が小さくなり逆変換器の無効電力消費は減少する。また、進み制御角を小さくすることは、逆変換器入力電圧を小さくしても実現される。このように、無効電力消費がタップを操作することにより減少するので、タップ操作で最大供給電力が改善できる。更に、順変換器入力電圧を高くすることは、直流送電電力を大きくする効果もあるので最大供給電力を合せて改善

する。図 5 の結果は以上の効果によるものである。

3. 動的電力供給特性の検討

〈3・1〉 過渡 $P-V$ 曲線 動的電圧安定性を検討するために、動的電力供給特性を調べる過渡 $P-V$ 曲線⁽⁴⁾を導入する。本論文でいう注目ノードの過渡 $P-V$ 曲線は、非注目ノードの P, Q を指定値に固定、スイングノード以外の発電機ノードは P, V 指定値に固定した状態で注目ノードにある負荷モデルを接続し、じょう乱を起こした後の P と V の軌跡を描いたものとする。この曲線によって、系統の動きに対して負荷の動きが速い場合の系統の供給特性が得られる。

負荷モデルには動的電圧安定性にとって過酷な図 6 の簡易誘導電動機モデルを用いる。この負荷モデルの過渡 $P-V$ 曲線は次のようになる。いま、負荷が図 7 (a)に示すような $P-V$ 平面上の点 a で動作しているとする。この動作点は、負荷の要求する機械出力 P_m と誘導電動機の滑り一定の $P-V$ 曲線の交点に相当する。この動作点の無効電力を一定にした状態で消費電力を大きくし系統の $P-V$ 軌跡を描いたのが、静的 $P-V$ 曲線である。しかし、実際の負荷の軌跡は無効電力消費が一定でなく、消費電力の増加に伴い増加するために、図 7 (b)のように、負荷要求電力の増加に伴い運転点が点 b に移動する。

ところで、誘導機の滑り一定の $P-V$ 曲線は滑りが小さいうちは、滑りが大きくなるにつれて傾きが小さく、つまり時計方向に回転するが、負荷の滑り s が $r/s=x$ の条件を満たす滑り s より大きくなると逆に傾きが大きく、つまり反時計方向に戻ってくる。以上のことより、負荷の過渡 $P-V$ 曲線の最大供給電力は図 7 (c)に示すように静的 $P-V$ 曲線のものよりも小

図 6 負荷モデル
Fig. 6. Load model.

図 7 過渡 P - V 曲線の概念
Fig. 7. Concept of transient P - V curve.

さくなる。つまり、静的 P - V 曲線が消費無効電力の一定の P - V 曲線であったのに対し、本論文の負荷モデルの過渡 P - V 曲線は負荷の状態変数が滑り s だけであることから、リアクタンス x 一定の P - V 曲線になる。

別の見方をすれば、系統の無効電力補償が負荷の無効電力消費の変化に十分対応できる場合は、系統から見たとき負荷ノードは、定無効電力消費ノードと見ることでき、静的 P - V 曲線の軌跡上を運転点が移動していくと考えられるが、負荷の動きが早く無効電力補償がほとんど行えないような状態では、ほぼ過渡 P - V 曲線上を動き供給可能電力が小さくなることが推測される。この過渡 P - V 曲線を比較することにより、系統が動きの早い負荷に対して、どの程度対応できるかを知る目安になる。

過渡 P - V 曲線の最大電力は、系統の供給能力に影響を受けることはもとより、誘導電動機負荷モデルのリアクタンスに大きく左右される。本論文の負荷モデルの場合は誘導電動機の比例推移の関係により、系統側を無限大母線とすれば、最大消費電力は誘導電動機負荷モデルのリアクタンス x により決定され、抵抗はその最大消費電力を発生する滑りを決定するのみである。そこで、本論文の過渡 P - V 曲線初期値計算時には P, Q 指定でなく、 P とリアクタンス x を指定して計算を行っている。

〈3・2〉 各種制御方式の過渡解析

(1) 負荷要求電力急増の場合 図 8 (a) に負荷要求電力が急増した場合の、逆変換器ノードの過渡 P - V 曲線を示す。条件は、誘導電動機負荷モデルのリアクタンスを 0.15 pu にしたほかは静的 P - V 曲線を計算したときと同じである。タップは初期値計算時に変換器入力電圧が 1.0 pu になるようにし、その後は変化しないものとしている。この場合は交流系統が最も

図 8 過渡 P - V 曲線
Fig. 8. Transient P - V curves.

有利である。しかし、定 α ・定電流制御のタップを図5で得られた静的に有利な条件に設定し初期値計算を行い、過渡 P - V 曲線を描くと図8(b)のようになり定 α ・定電流制御が有利になる。また、交流連系線1回線開放を意味する交流連系のアドミタンスを半分にし、かつ、(b)図と同じタップ条件で過渡 P - V 曲線を描くと(c)図のようになり、各直流送電線を含んだ場合の動的最大供給電力がほとんど変化しないのに対して、直流系統を含まない場合は大きく減少する。

更に、ノード消費電力が小さく静的 P - V 曲線の傾きが通常とは逆の領域で過渡 P - V 曲線の傾きも逆になっている。これは、系統の静特性が逆の傾きをもっているためである。しかし、過渡 P - V 曲線の傾きが逆でも、電圧不安定であるとは言いきれない。なぜなら、この過渡 P - V 曲線は負荷の動きを系統から見た場合にどのような軌跡をとるかを示しているだけで、負荷の要求トルクと系統の供給電力の差を直接表してはいない。つまり、静的あるいは動的の P - V 曲線から安定性を論じるには注意が必要である。

(2) 交流連系線の一回線開放によるじょう乱が加えられた場合 直流送電線を付加した系統が交流連系線のアドミタンスの変化に対して強いことを交流連系線の一回線開放時のシミュレーションで示す。条件は、逆変換器ノードの初期電力を2.1 puとしたほかは(1)項のとおりである。定 α ・定電流制御(タップが最も有利な状態)の制御特性をもつ直流送電システムを付加した場合と、直流送電システムを付加しない場合の交流連系線1回線開放時の動きをシミュレーションしたのが図9(a)、(b)である。交流連系線のみの場合には崩壊してしまっているが、直流送電がある場合には系統への影響はほとんどない。これは、前述のように直流送電を含んだ系統では、動的な供給能力がほとんど変化しないということより説明できる。なお、交流連系線を変化させずに直流送電線が開放された場合のシミュレーションを(c)図に示す。直流送電線が開放されても負荷の運転を妨げるような電圧崩壊には至っていない。以上のことより、直流送電線を系統に組込むことにより、動的供給能力を著しく改善しないまでも外的なじょう乱に対する耐力を強くすることができるといえる。

4. 終りに

本論文では、電圧安定度を改善するという観点から線路の無効電力損失がないという直流送電の利点を生かして、系統の短絡容量を増大させずに系統の供給可能電力を増加させることを検討した。検討の結果、直

(a) 交流連系線1回線開放(直流送電あり)

(b) 交流連系線1回線開放(直流送電なし)

(c) 直流送電開放

図9 過渡シミュレーション結果
Fig. 9. Transient simulations.

流送電線を付加することにより、順変換器設置ノードでは直流交換器の無効電力消費が悪影響を及ぼすが、逆変換器設置ノードでは短絡容量の増加、動的供給能力の低下を発生することなく、静的供給能力、交流連系線1回線開放のような大じょう乱後の過渡供給可能電力の向上が可能であることがわかった。今後、定 α ・定電流制御方式について従来の同期安定度との関

係や直流送電電圧への影響を詳細に検討する必要がある。
(平成2年11月19日受付)

文 献

- (1) Y. Sekine, A. Yokoyama: "MULTI SOLUTIONS FOR LOAD FLOW PROBLEM OF POWER SYSTEM AND THEIR PHYSICAL STABILITY", 7th PSCC Proc., p. 819 (1981)
- (2) H. Ohtsuki & Y. Sekine: "CASCADED VOLTAGE COLLAPSE", 89SM 210-5-PWRS at IEEE/PES summer meeting, Long Beach, (1989)
- (3) 林他: 「交直連系系統の潮流計算手法の開発」, 電中研報, No. 73068
- (4) H. Ohtsuki, A. Yokoyama & Y. Sekine: "TRANSIENT P-V CURVES USED FOR THE ANALYSIS OF TRANSIENT VOLTAGE STABILITY", 10th PSCC Proc. p. 1202-1209, 1990
- (5) 小島, 他: 「系統負荷特性のモデル研究」, 電気学会電力技術研究会 PE-89-8 (平成元)
- (6) 町田: 直流送電 (東京電機大学出版)

多 田 泰 之 (正員)

昭和38年3月20日生。56年3月埼玉県立川越工業電気科卒業。同年4月東京電力(株)入社。63年東電学園大学部卒業。平成元年4月より, 同社技術研究所系統研究室で電力系統の研究, 解析業務に従事。この間, 平成元年4月より1年間東京大学工学部電気工学科受託研究長。

横 山 明 彦 (正員)

昭和31年10月9日生。59年3月東京大学大学院工学系研究科電気工学専門課程博士課程修了。工学博士。同年4月東京大学工学部電気工学科助手, 60年同講師, 平成元年同助教授, 現在に至る。主として, 電力システム工学の研究に従事。日本応用数理学会, IEEE, CIGRE 会員。

関 根 泰 次 (正員)

昭和6年12月7日生。34年3月東京大学大学院数物系研究科博士課程修了。同年4月同大学工学部電気工学科講師, 35年同助教授, 47年同教授。工学博士。主として, 電力系統工学および系統工学の研究に従事。35年度, 45, 50年度, および62年度電気学会論文賞, 43年度および47年度電気学会著作賞, 49年度電気学会電力賞受賞。河上・倉田各研究奨励金受賞。47~48年度電気学会編修理事, 58~59年度同副会長, 平成元年度同会長。PSCC 会長, CIGRE 国内委員会委員長, IEEE Fellow, 日本工学アカデミー会員。