

直流送電の制御システム

技術士事務所 系統解析技術研究所

伊与田 功



目次

(1) 他励HVDC : 電流制御 (ACR), 電圧制御 (AVR), 余裕角制御 ($A\gamma R$), 最小値選択, および上位制御 (周波数安定化制御 (AFC), EPPSなど)

(2) 自励HVDC : 電流制御 (ACR)

d軸制御 : 有効電力制御 (APR,), 直流電圧制御 (DC-AVR),

q軸制御 : 無効電力制御 (AQR), 系統電圧制御 (AC-AVR)

(3) GFMとGFLについて



自己紹介

企業(三菱電機)で30年間 技術者として勤務

電力系統用パワーエレクトロニクス機器の開発研究

電力系統の諸現象の解析

高専・大学(大阪電気通信大学)で16年間 教員として勤務

電気機器、パワーエレクトロニクスなどの授業

卒業研究指導(パワエレ、リアルタイムシミュレータなど)

2021 大阪電気通信大学退職 技術士事務所「系統解析技術研究所」開設

現在 リアルタイムシミュレータ関連会社の技術顧問

(71歳) 放送大学学生(認定心理士の勉強)

洋上風力発電実証事業 検討委員会委員

IET(英国の電気学会)Fellow 日本支部長

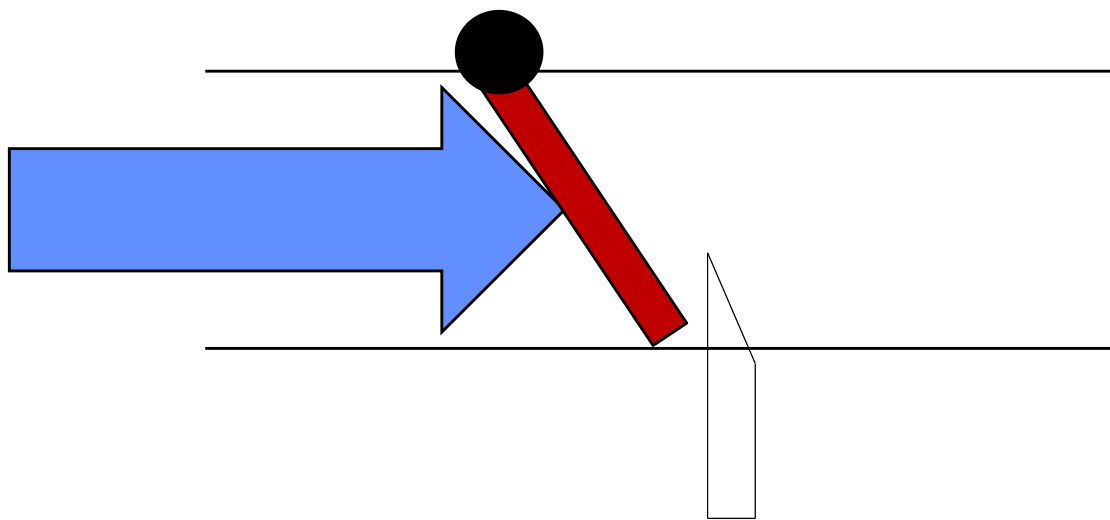
他励と自励の比較

	他励 (LCC)	自励 (VSC)	
使用素子	サイリスタ	IGBT	
制御変数	1変数(ターンオン時間)	2変数(ターンオン時間ターンオフ時間)	
制御可能変数	1変数(例:有効電力を制御すれば無効電力は従属変数となる)	2変数(例:有効電力と無効電力の2変数を独立に制御できる)	
制御能力	低速で低い(1サイクル1回の点弧制御)	高速で高い(PWM制御)	
外部電源の必要性	転流(素子のターンオフ)のため必要	不要 ブラックスタート可	
損失	0.7~0.8%	0.8%	ABB資料
付属設備	大容量が必要(無効電力調整、高調波抑制)	少容量でよい	
接地面積	広大	コンパクト(他励の50~60%)	NEDO資料
実績	150サイト以上	約40サイト	ABB資料

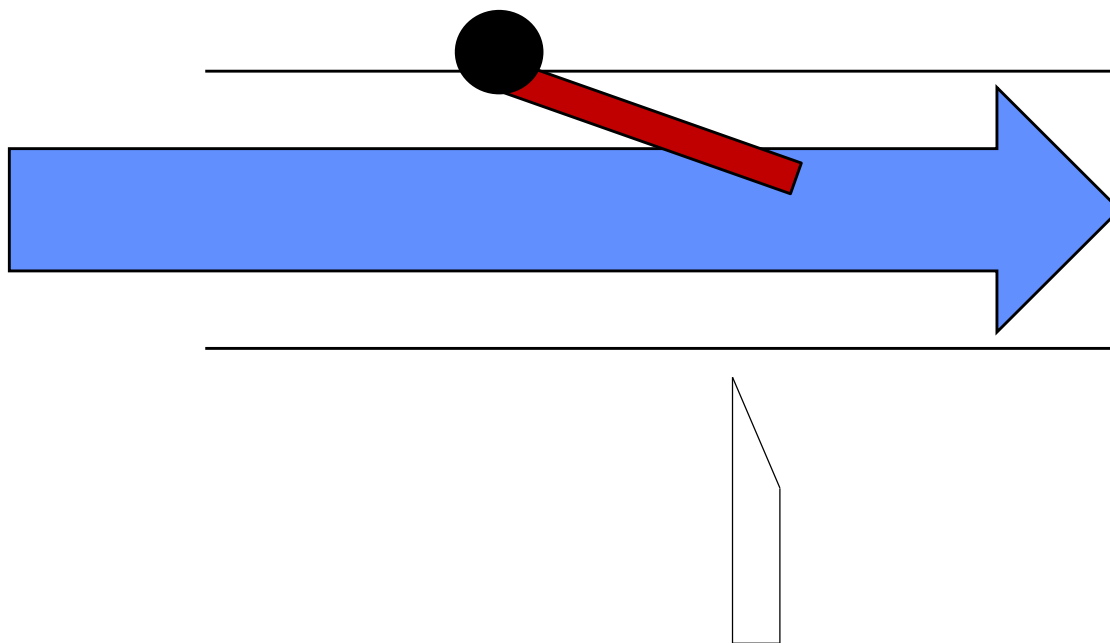
(LCC: Line Commutated Converter), VSC: Voltage Source Converter⁴



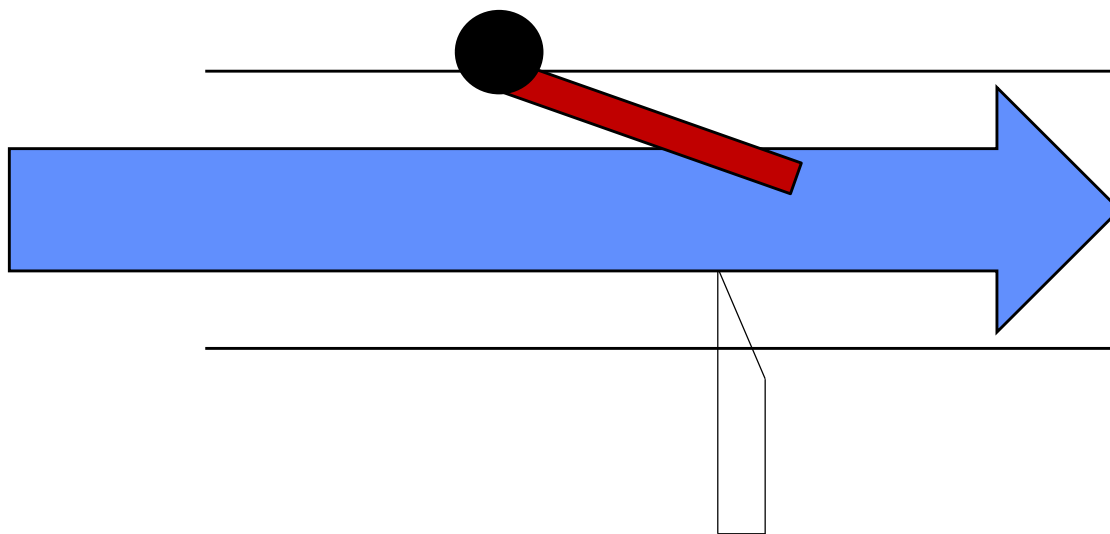
サイリスタの水流弁モデル



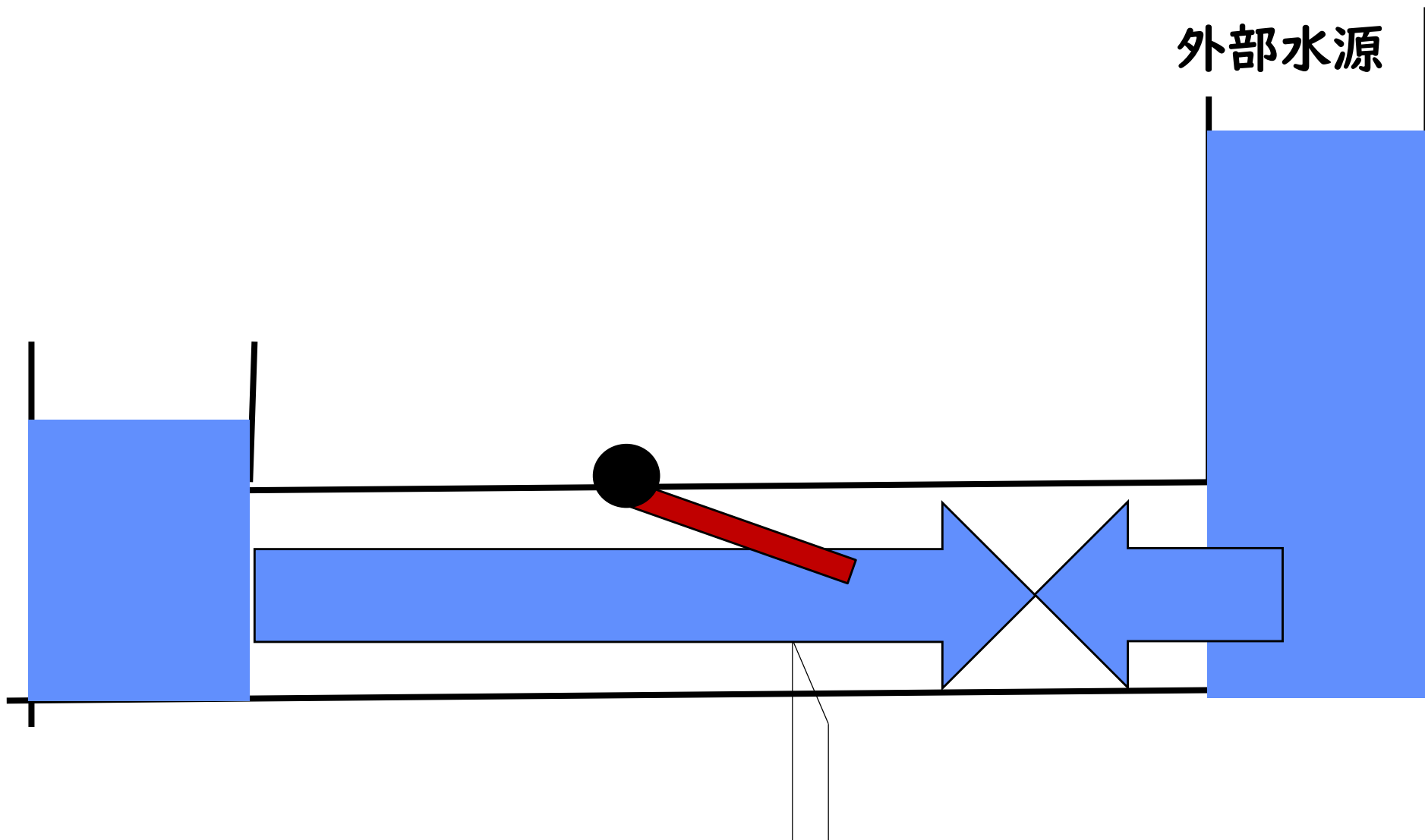
サイリスタの水流弁モデル



サイリスタの水流弁モデル



サイリスタの水流弁モデル

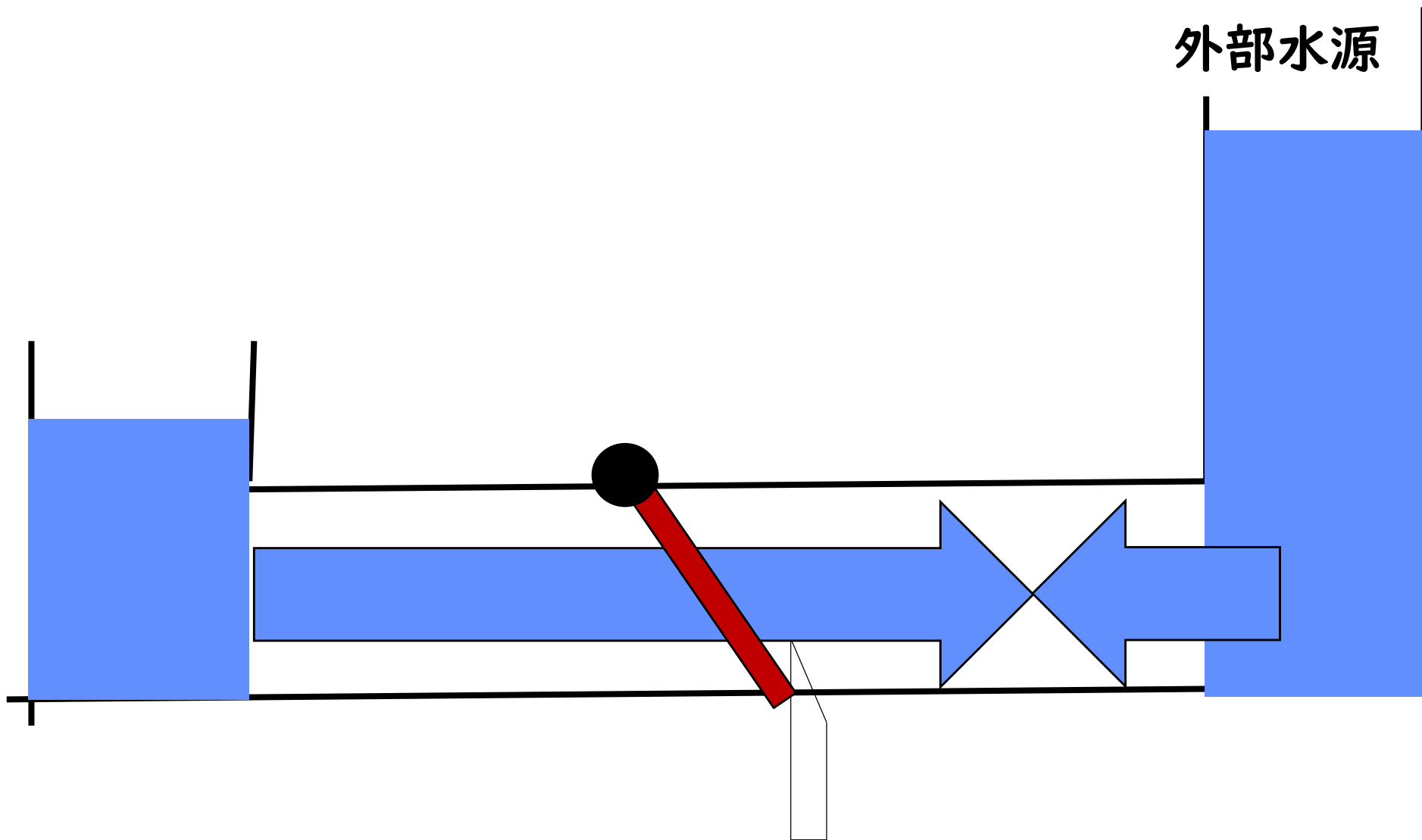


水流弁を閉じるには外部に水源が必要

サイリスタをターンオフするには外部に電源が必要



サイリスタの水流弁モデル



水流弁を閉じるには外部に水源が必要

サイリスタをターンオフするには外部に電源が必要



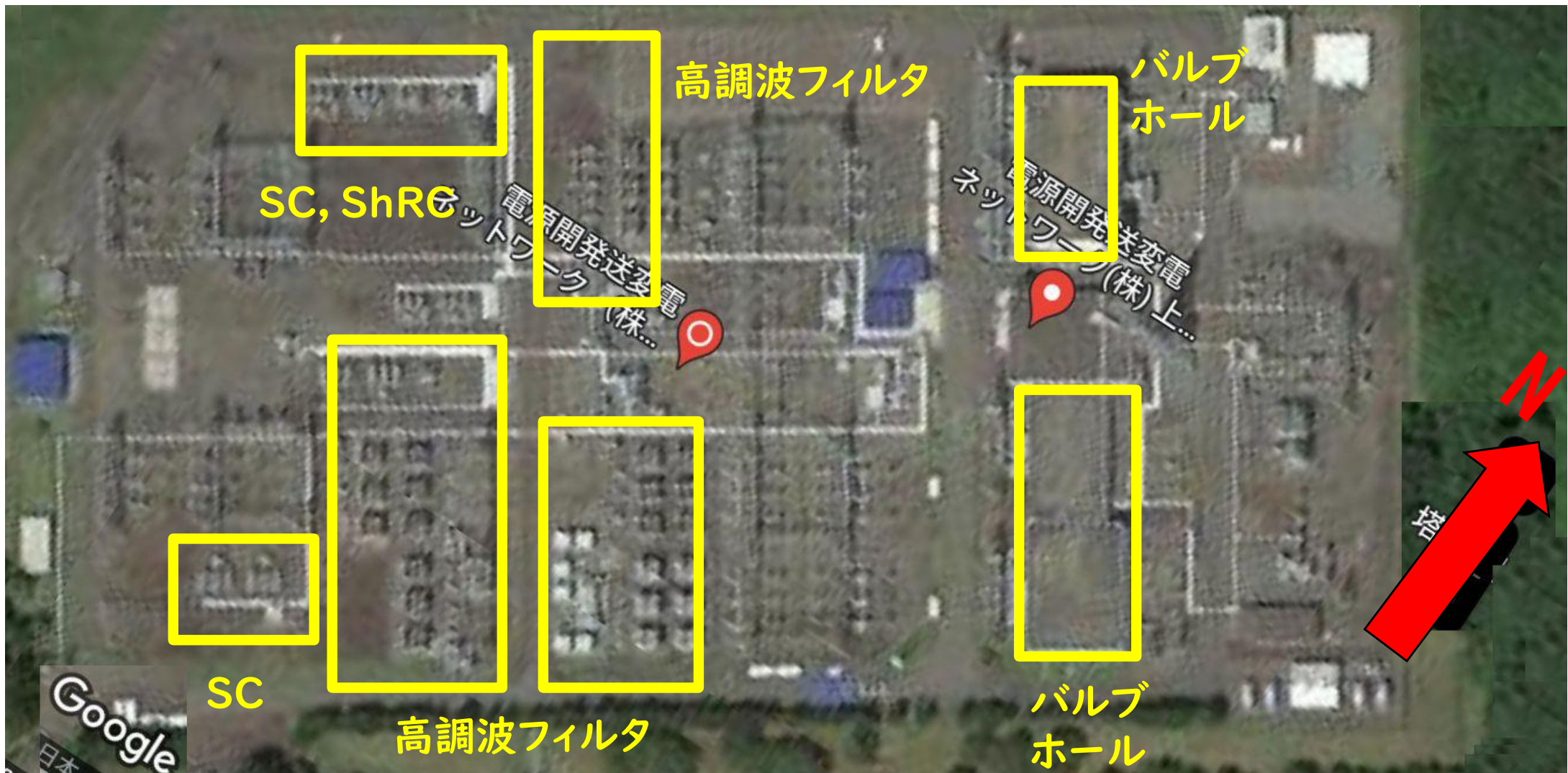
他励と自励の比較

	他励 (LCC)	自励 (VSC)	
使用素子	サイリスタ	IGBT	
制御変数	1変数(ターンオン時間)	2変数(ターンオン時間ターンオフ時間)	
制御可能変数	1変数(例:有効電力を制御すれば無効電力は従属変数となる)	2変数(例:有効電力と無効電力の2変数を独立に制御できる)	
制御能力	低速で低い(1サイクル1回の点弧制御)	高速で高い(PWM制御)	
外部電源の必要性	転流(素子のターンオフ)のため必要	不要 ブラックスタート可	
損失	0.7~0.8%	0.8%	ABB資料
付属設備	大容量が必要(無効電力調整、高調波抑制)	少容量でよい	
接地面積	広大	コンパクト(他励の50~60%)	NEDO資料
実績	150サイト以上	約40サイト	ABB資料

(LCC: Line Commutated Converter), VSC: Voltage Source Converter¹⁰



他励HVDCの変換所航空写真



残りの場所には各コンポーネントを入り切りする開閉器類がある。



他励変換所の配置図から言えること

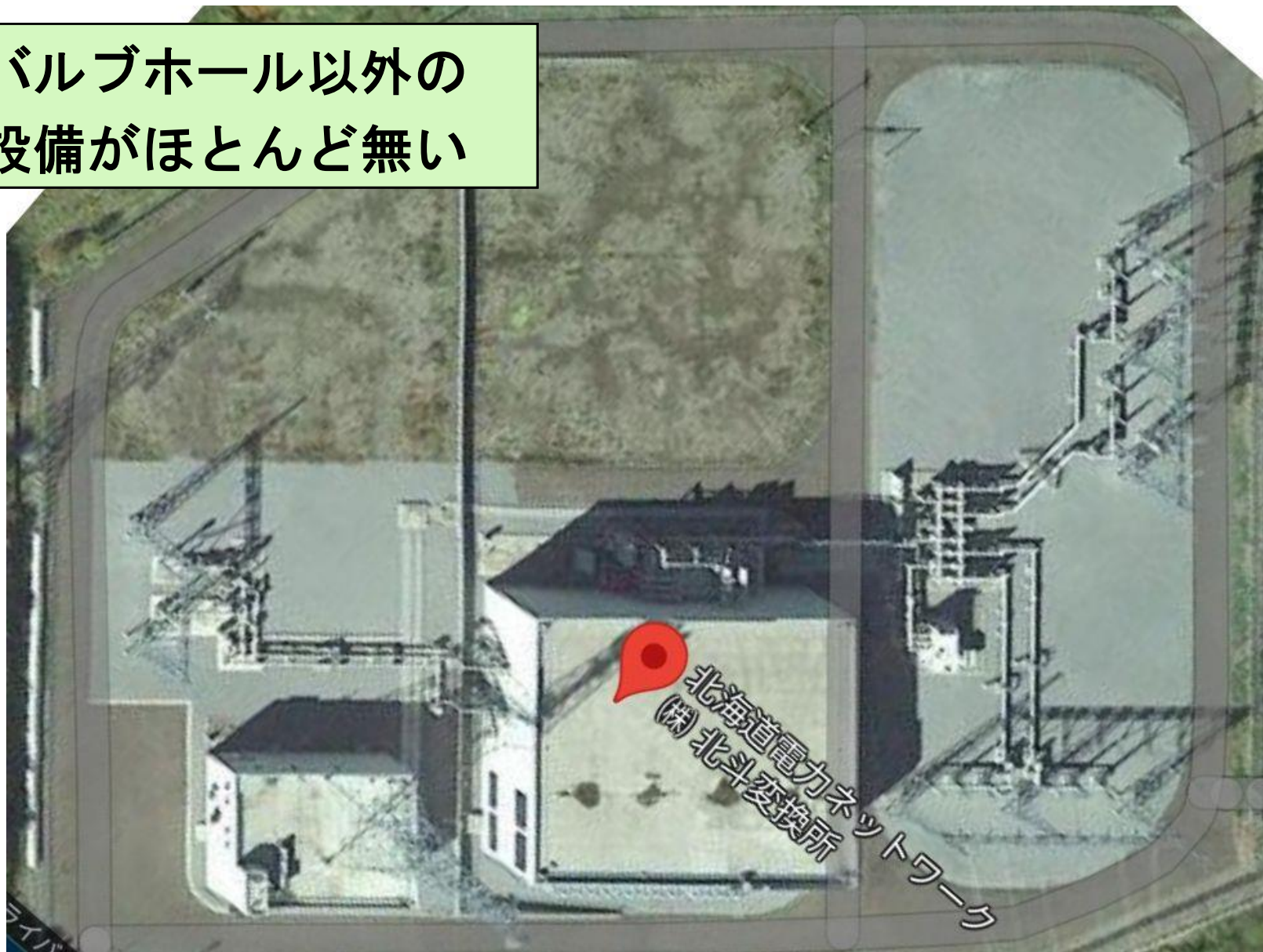
他励変換器では、高調波フィルタやシャントキャパシタ、シャントリアクトルなど無効電力を調整するためのコンポーネントが多数必要となり、それを入り切りするための開閉器も多数必要になり、設置面積が大きくなる。自励変換器では、それらの機器がほとんど不要になるので、設置面積が小さくなる。

システム制御の観点からは、変換器の出力状態に合わせて、シャントキャパシタ、シャントリアクトルを入り切りする制御が必要になる。



自励HVDC変換所の航空写真

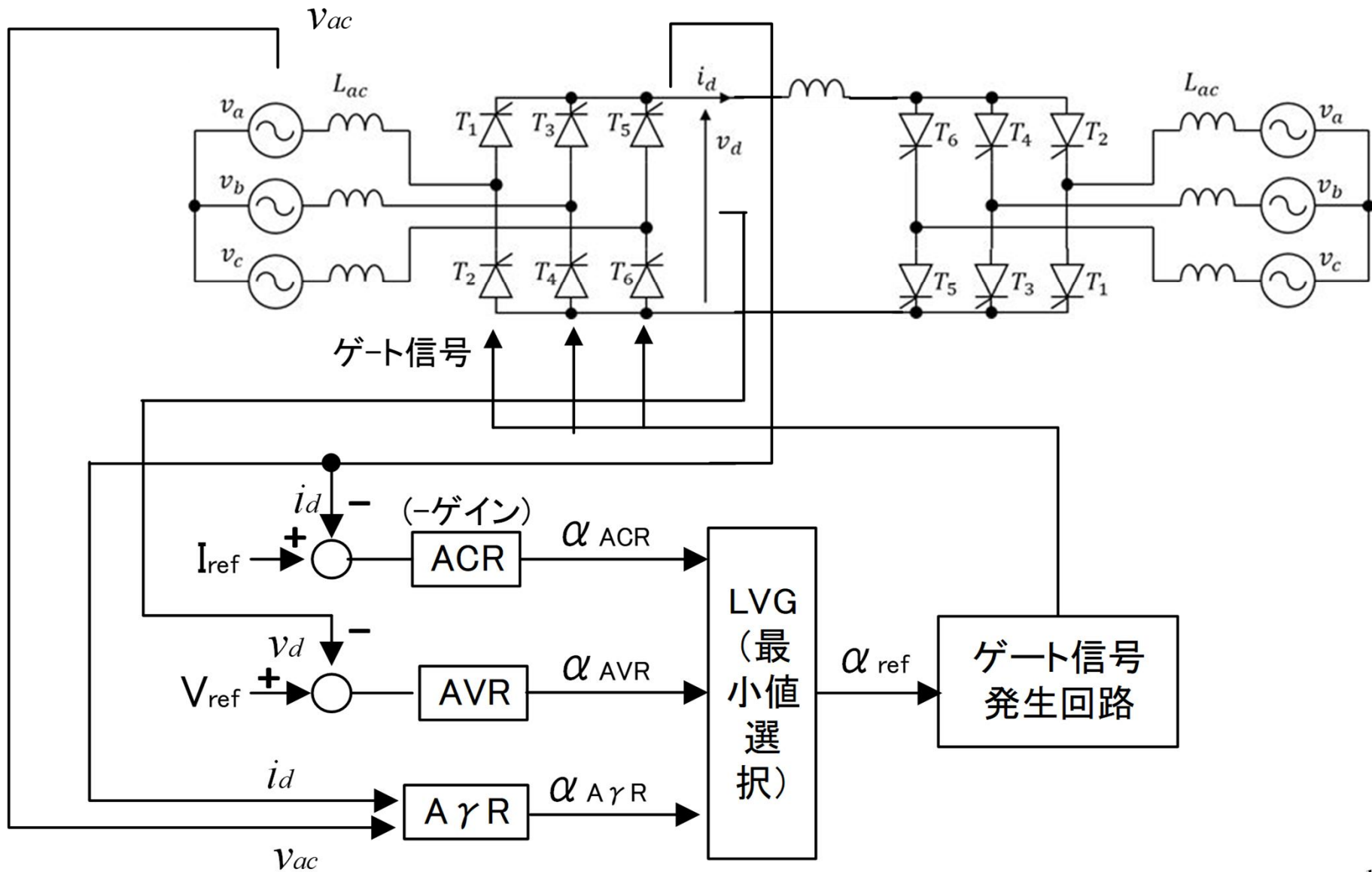
バルブホール以外の
設備がほとんど無い



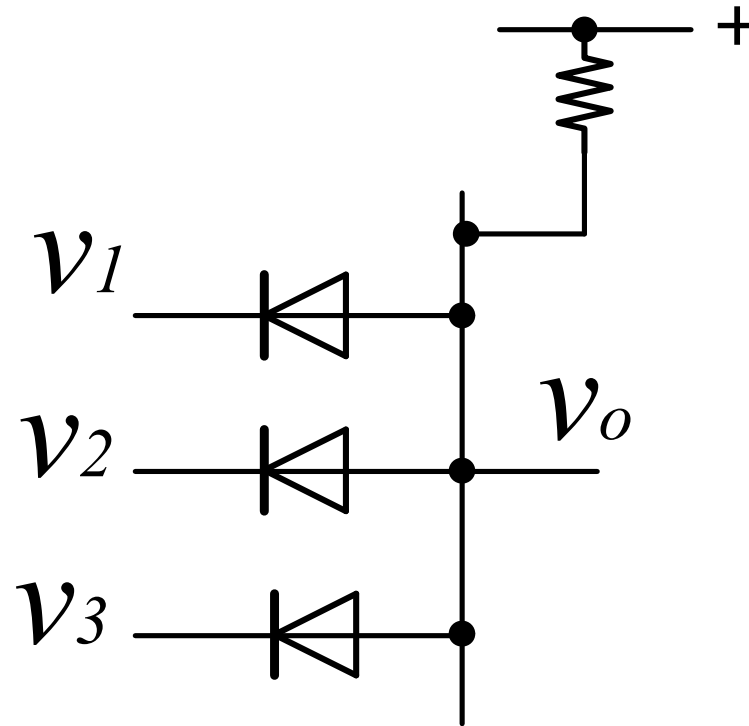
(1) 他励HVDCのシステム制御



他励HVDCのシステム制御



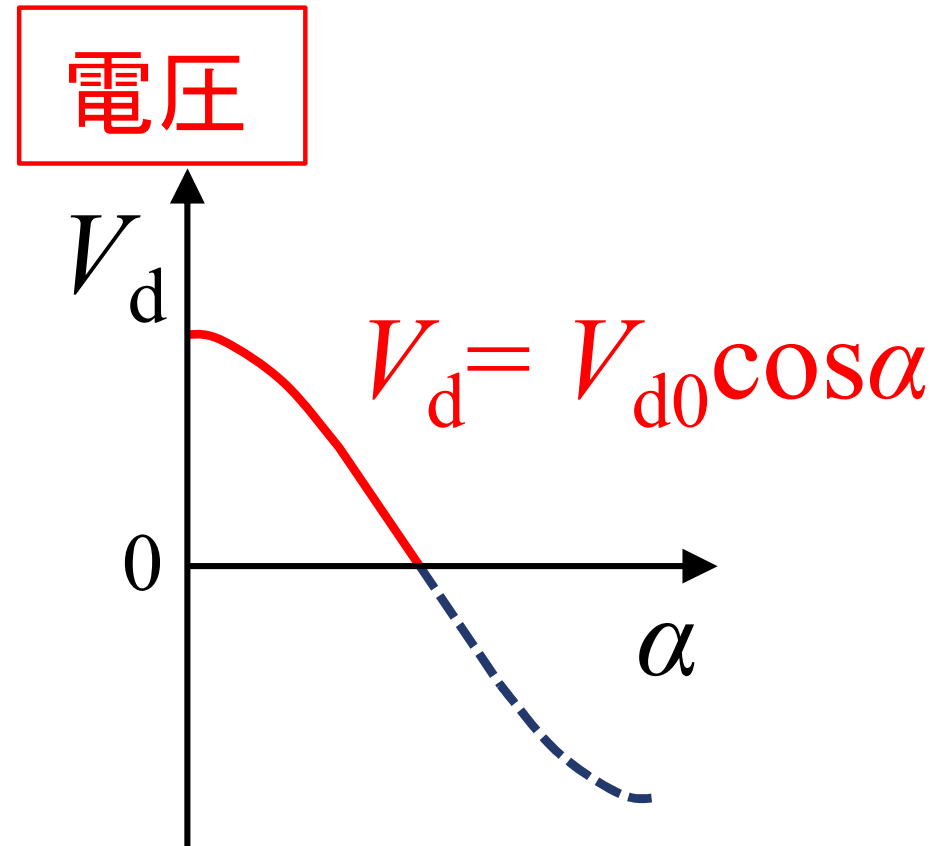
LVG (Low Value gate) 回路



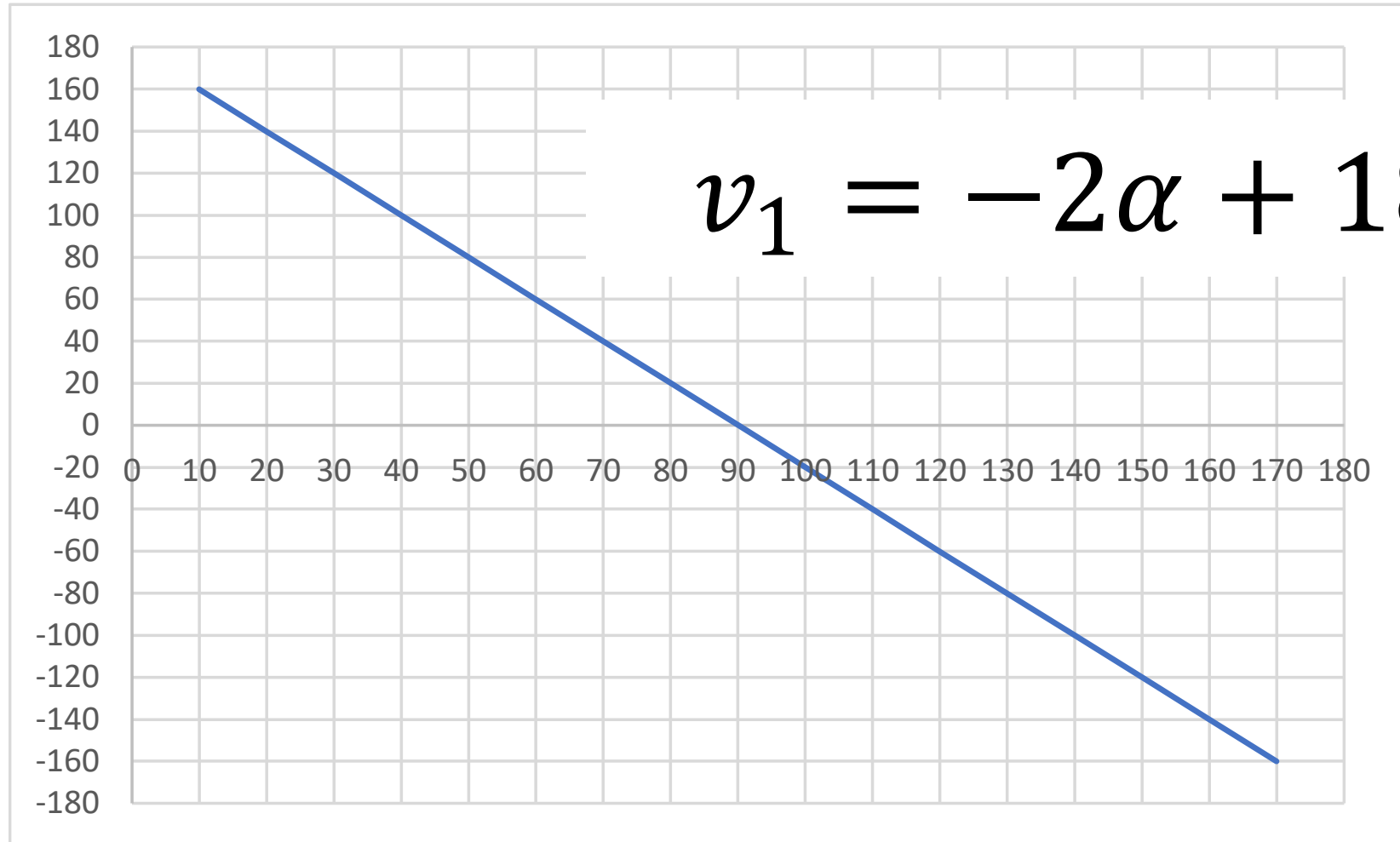
$$v_o = \text{Min}(v_1, v_2, v_3)$$



他励変換器の点弧角 α と直流電圧 V_d の関係



他励変換器の点弧角 α と変換器発生直流電圧近似



$$v_1 = -2\alpha + 180$$

①実際の点弧角 α は $10^\circ \sim 170^\circ$ に制限されると仮定する。
指令が $\alpha = 5^\circ$ でも 10° にしかならない。従って、変換器電圧 v_1 は $160V \sim -160V$ の間で変化する。

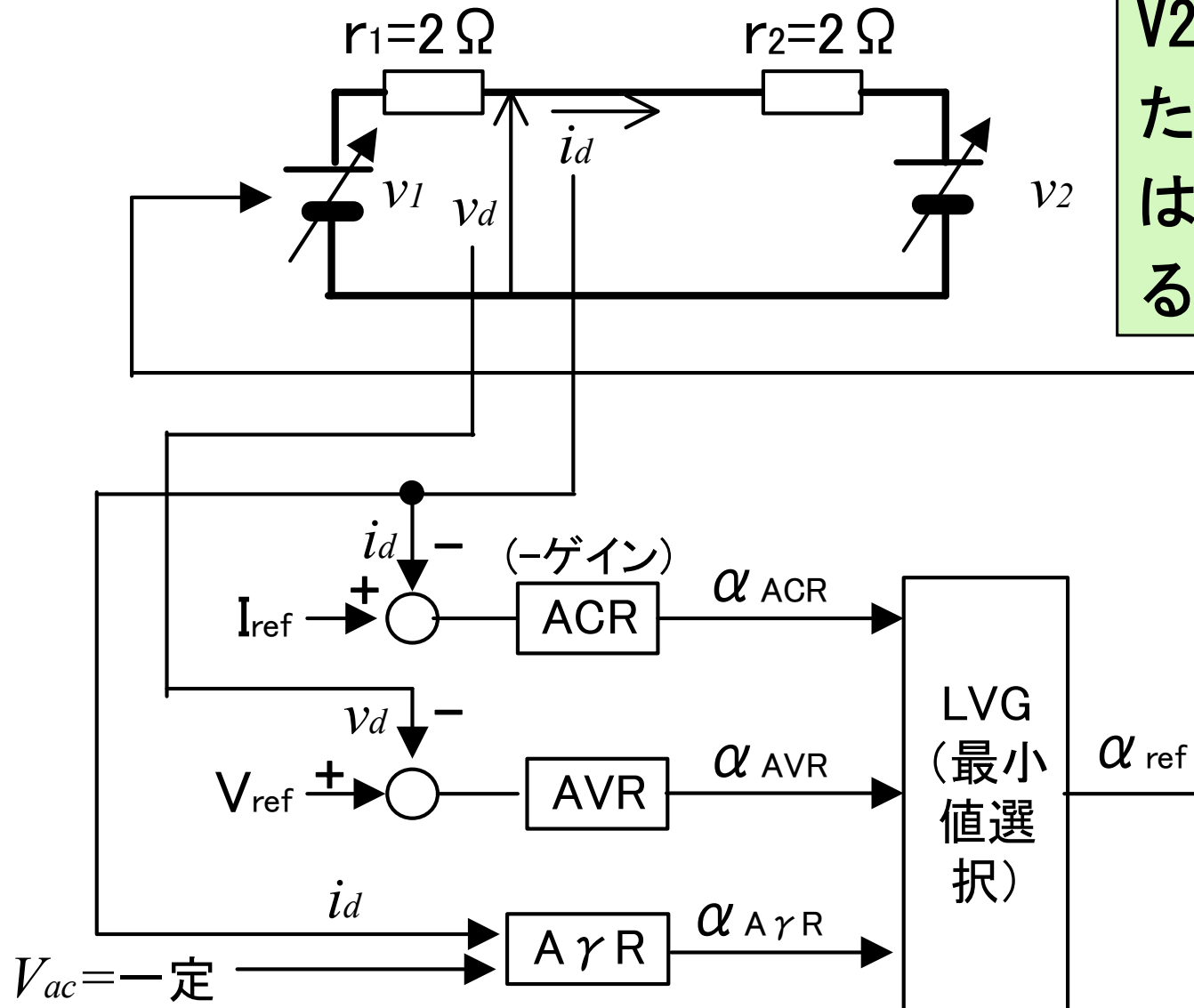


直流送電の簡易等価回路

定格電流

$i_d = 10\text{A}$,
定格電圧

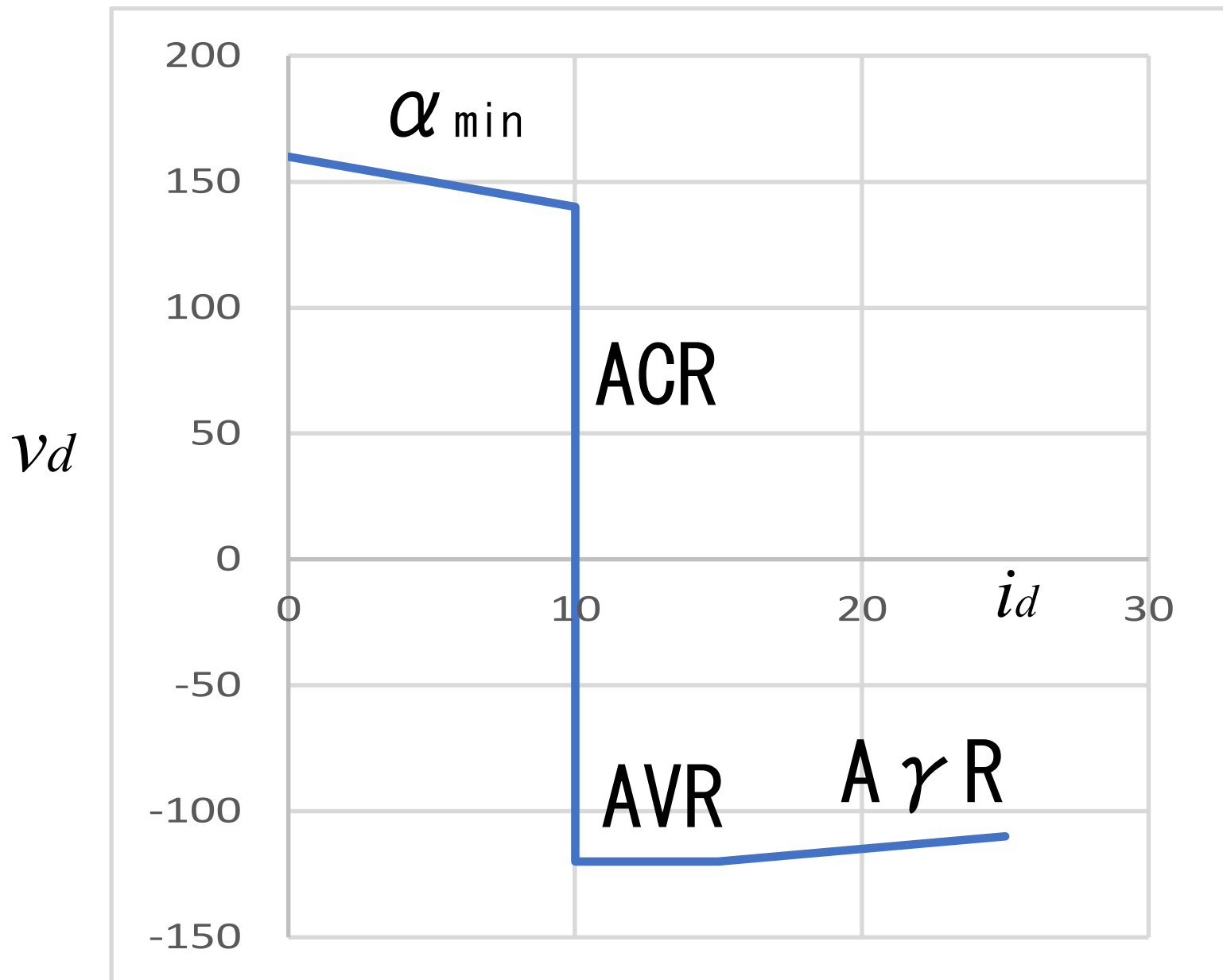
$V_d = 120\text{V}$



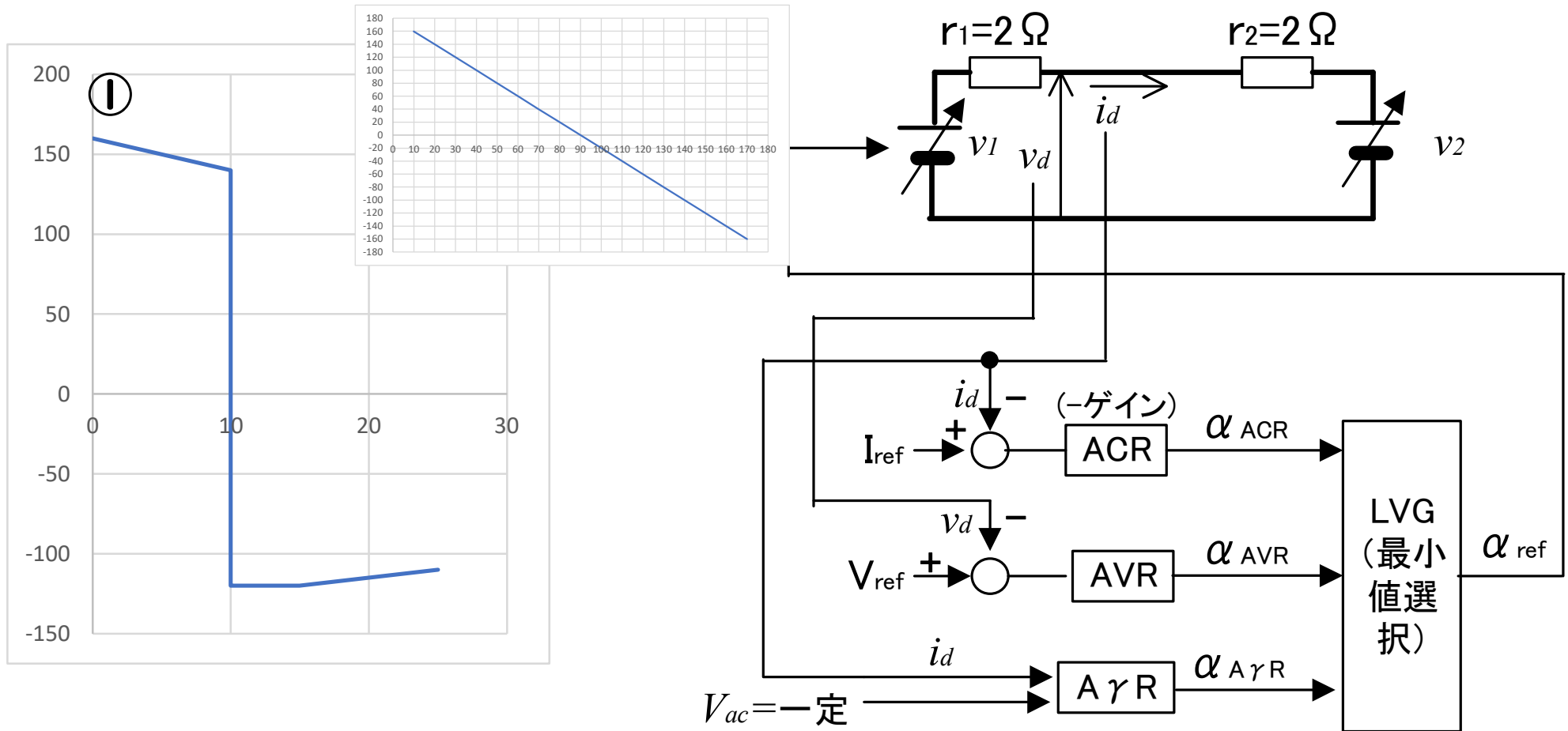
V2を変化させたら、 i_d , v_d はどう変化するか？



他励変換器のV-I特性



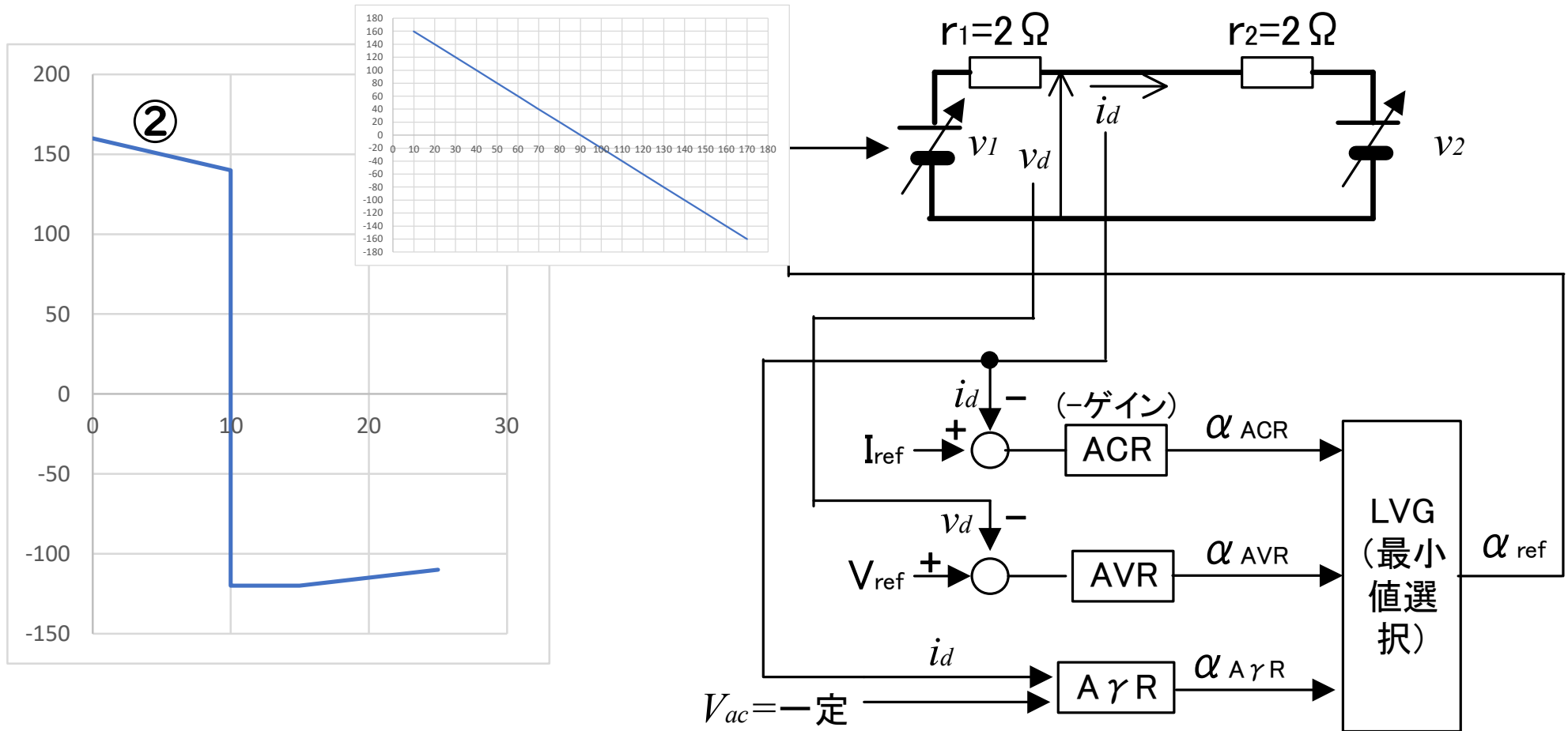
他励変換器のV-I特性



① $V_2=160V$ の時、ACRは V_1 を $200V$ にして $i_d=10A$ を流そうとするが、 v_1 は最大 $160V$ なので、直流電流 $i_d=0A$ で、 $v_d=160V$ である。



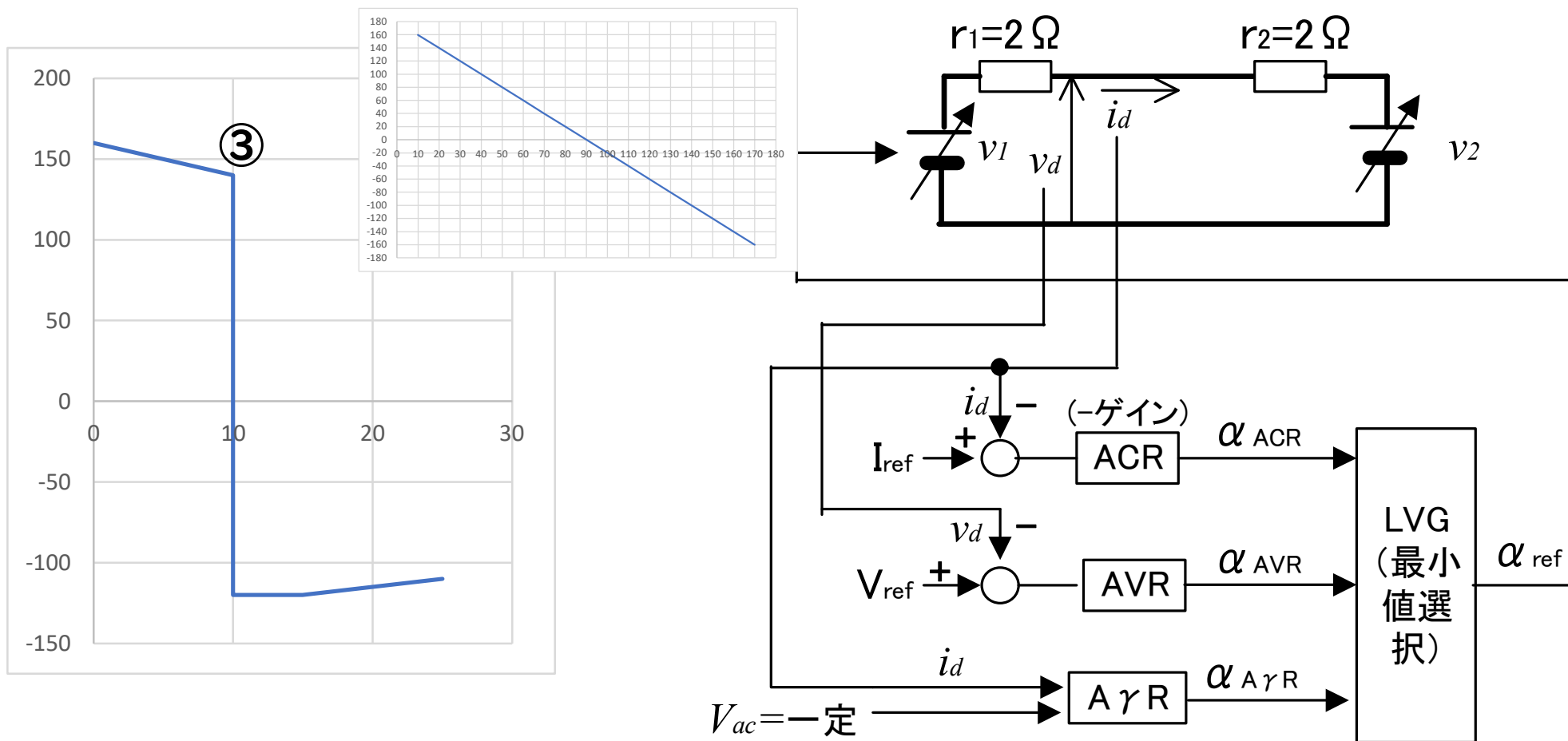
他励変換器のV-I特性



② $V_2=140$ Vの時、ACRは V_1 を180Vにして $i_d=10$ Aを流そうとするが、 v_1 は最大160Vなので、直流電流 $i_d=5$ Aで、 $v_d=150$ Vである。



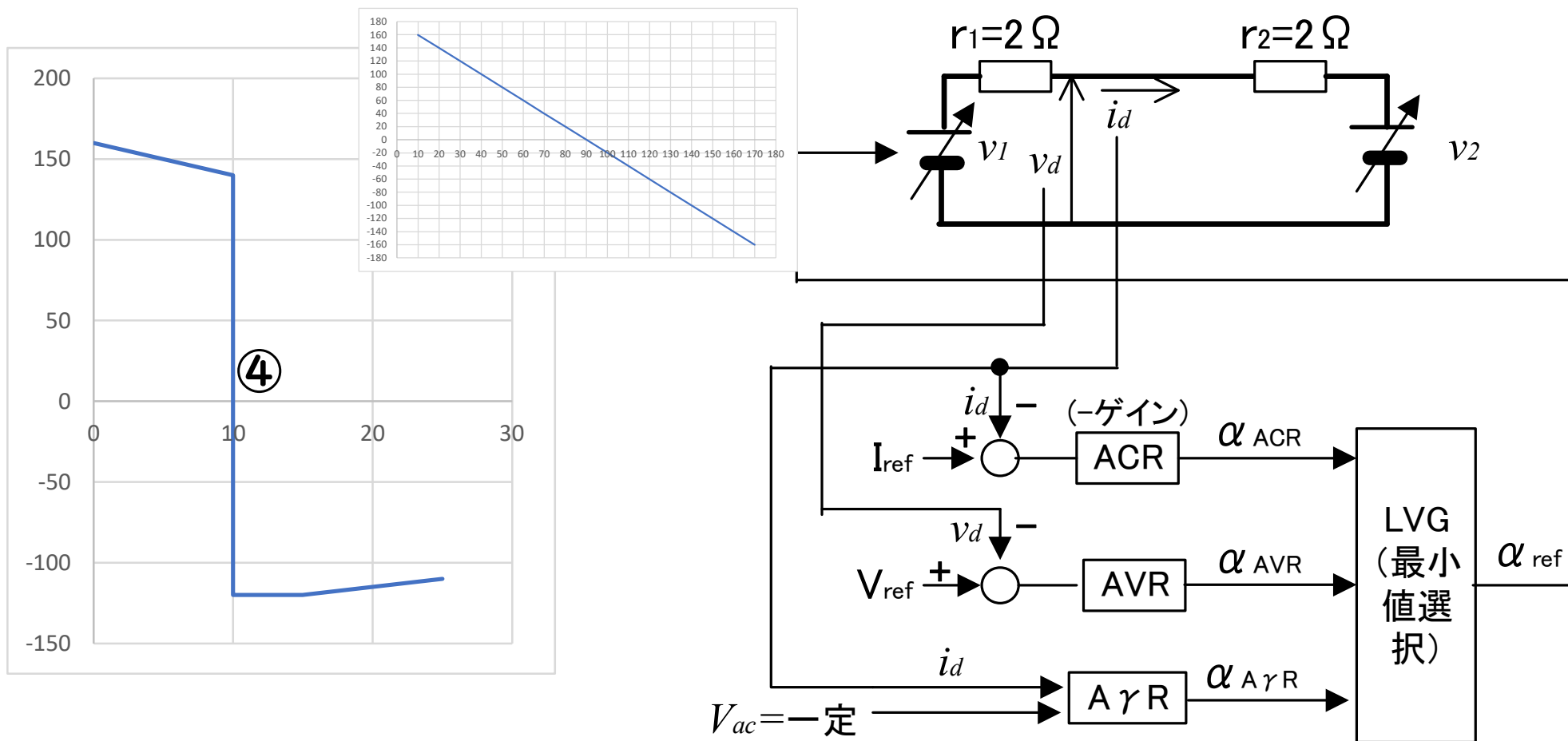
他励変換器のV-I特性



③ $V_2=120V$ の時、ACRは V_1 を $160V$ にして $i_d=10A$ を流す $v_d=140V$ となる。



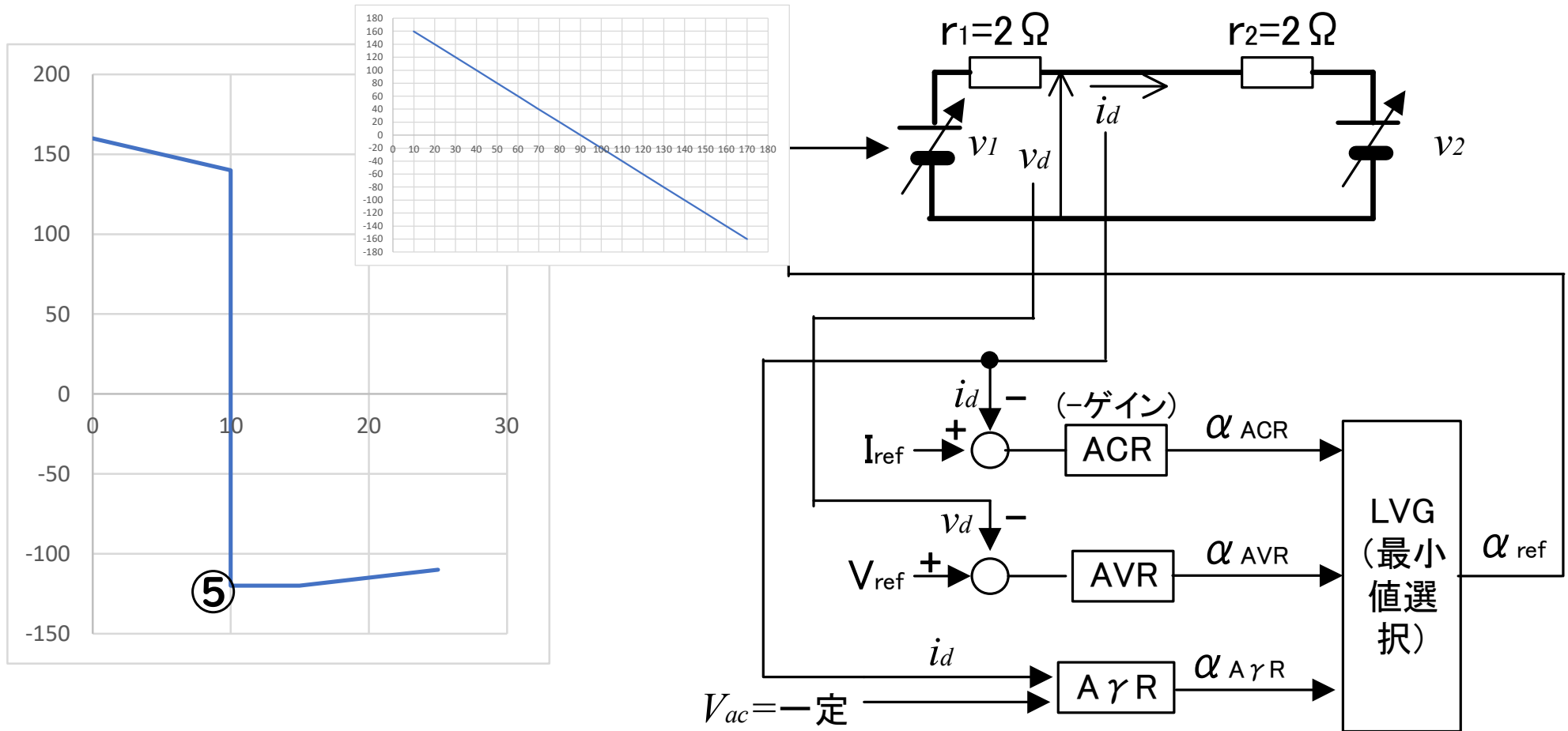
他励変換器のV-I特性



④ $V_2=0V$ の時、ACRは V_1 を40Vにして $i_d=10A$ を流す。 $v_d=20V$ となる。

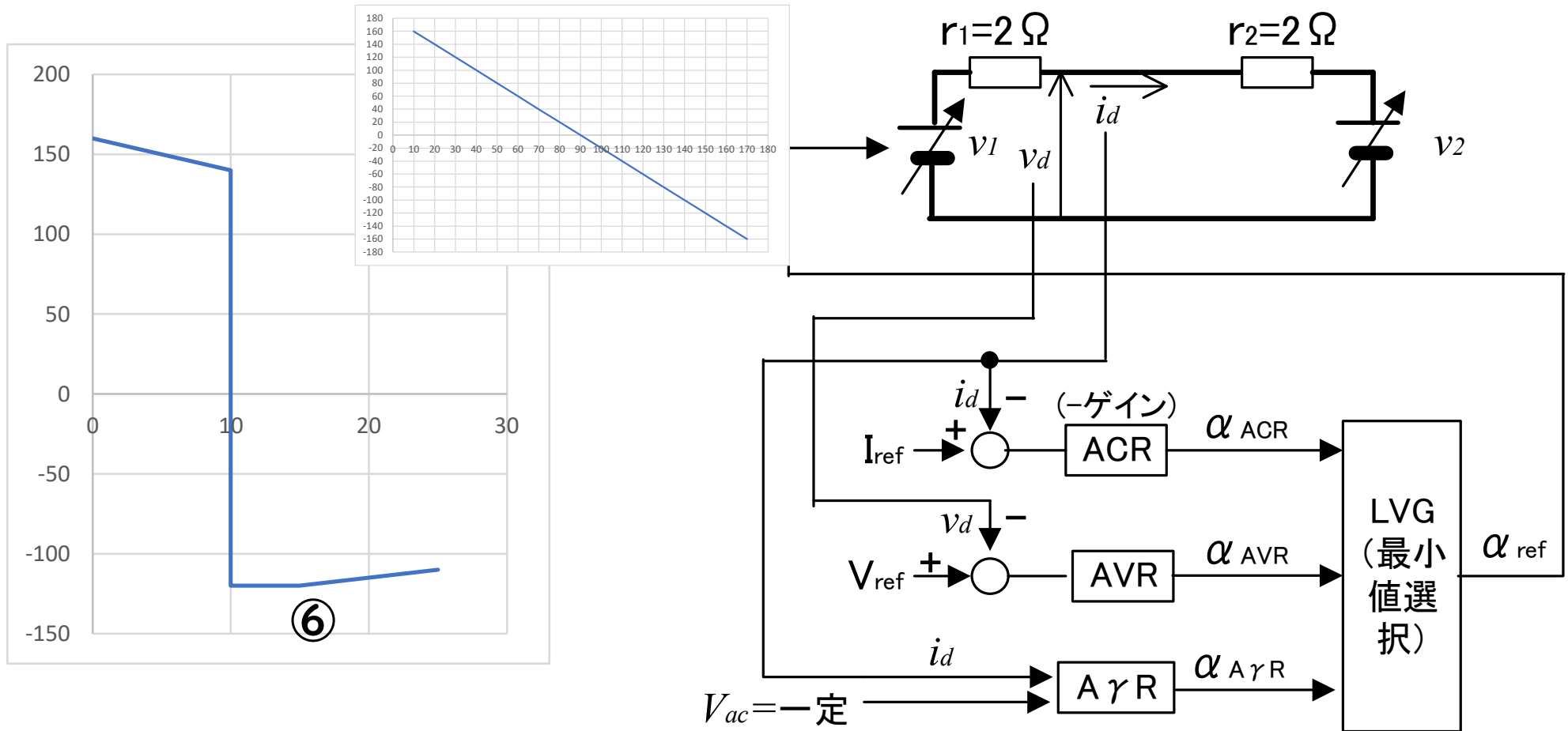


他励変換器のV-I特性



⑤ $v_2 = -140$ V の時、ACR は v_1 を -100 V にして $i_d = 10$ A を流す。また、AVR も v_1 を -100 V にして $v_d = -120$ V とする。どちらも α 指令は 140° である。

他励変換器のV-I特性



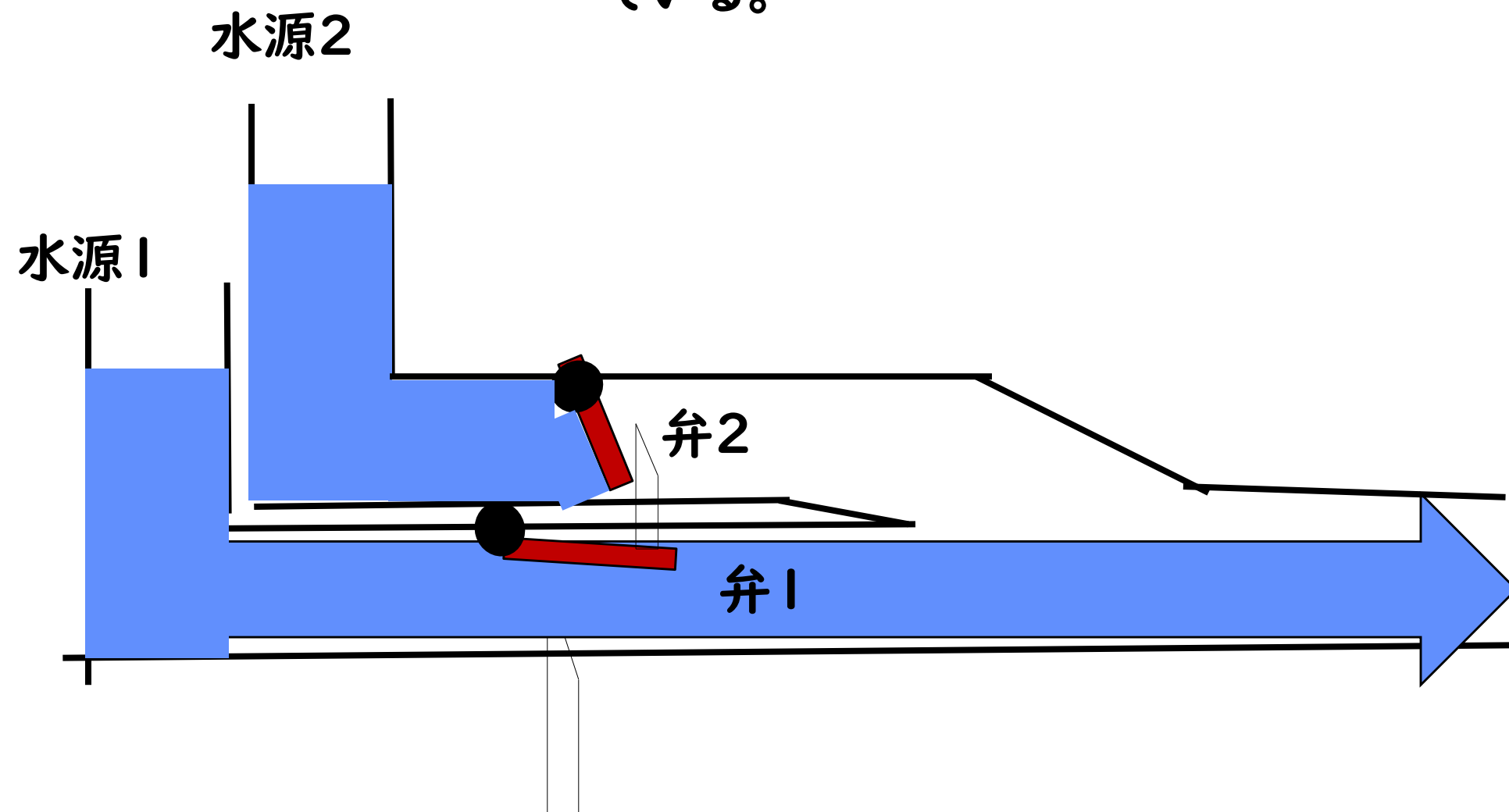
⑥ $V_2 = -150V$ の時、ACRは V_1 を $-110V$ ($\alpha = 145^\circ$) にして $i_d = 10A$ を流そうとする。また、AVRは V_1 を $-90V$ ($\alpha = 135^\circ$) にして $v_d = -120V$ とする。 135° の方が小さいのでAVRが選択され $v_d = -120V$, $i_d = 15A$ となる。

A γ R（定余裕角制御）の説明



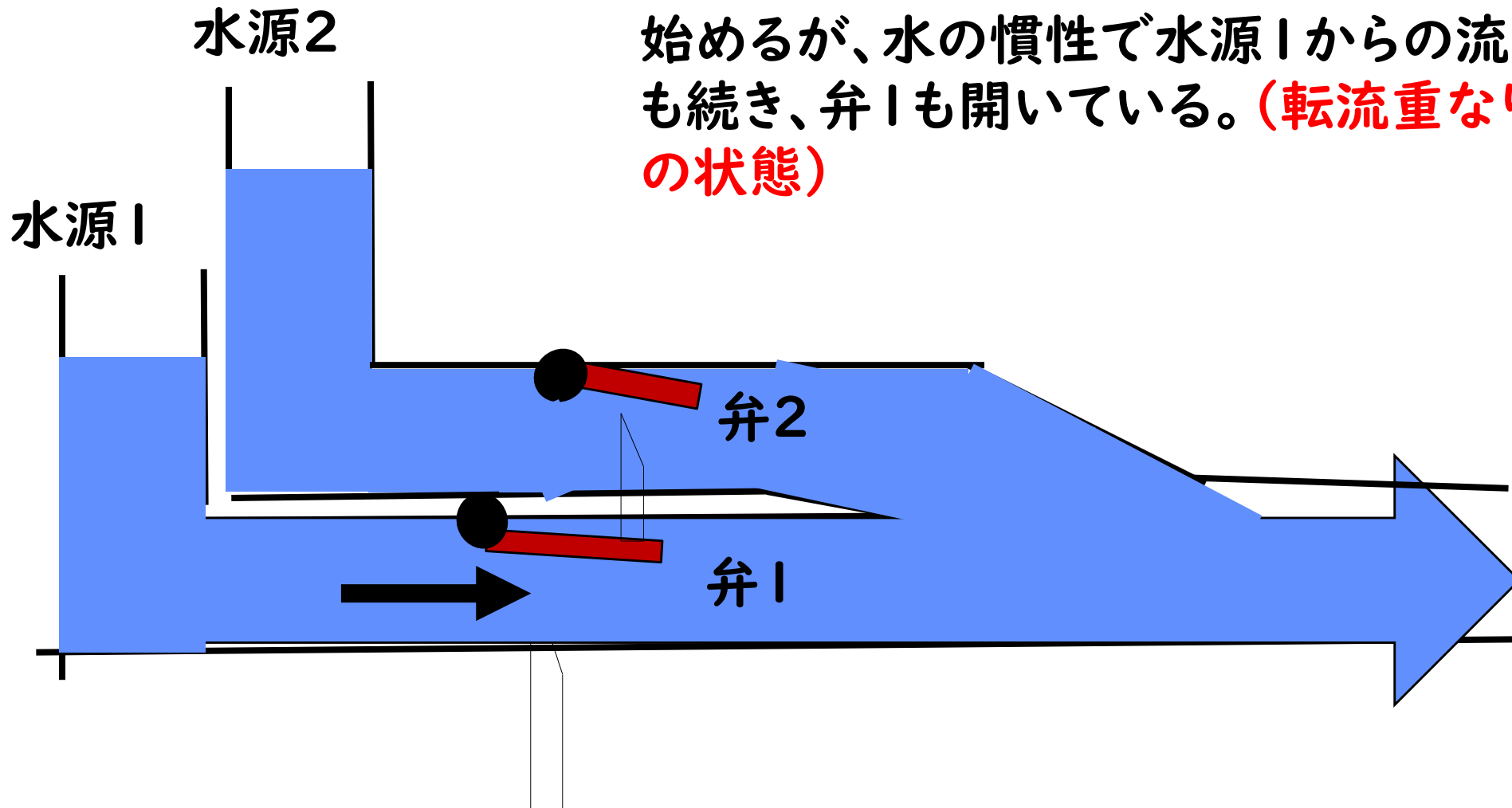
水流弁モデルによる転流と余裕角の説明

状態1：弁1が開き水源1から水が流れている。

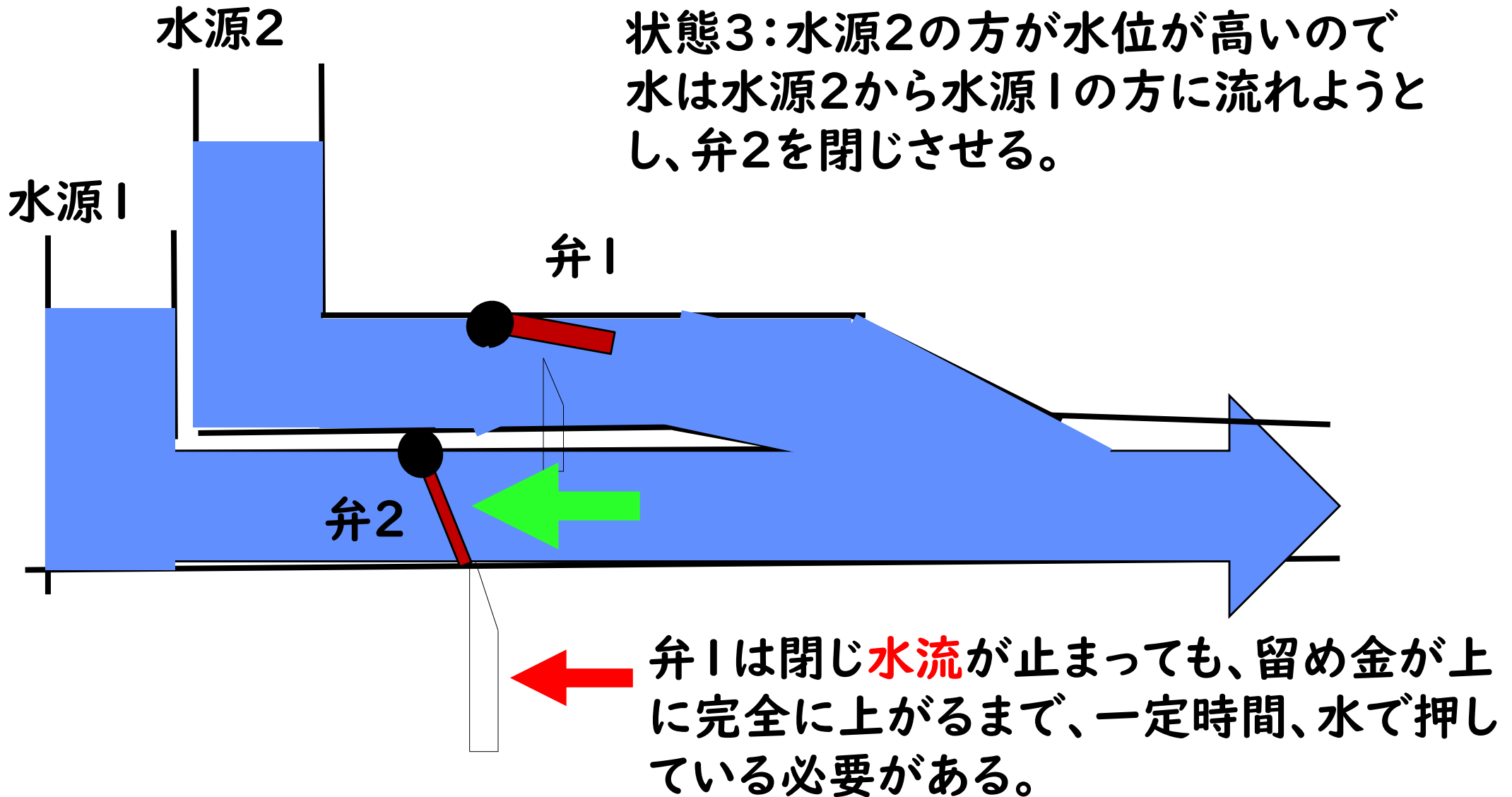


転流重なりの状態

状態2: 弁2を開くと水源2から水が流れ始めるが、水の慣性で水源1からの流れも続き、弁1も開いている。(転流重なりの状態)



転流完了直後の状態



水位逆転状態

水位が逆転

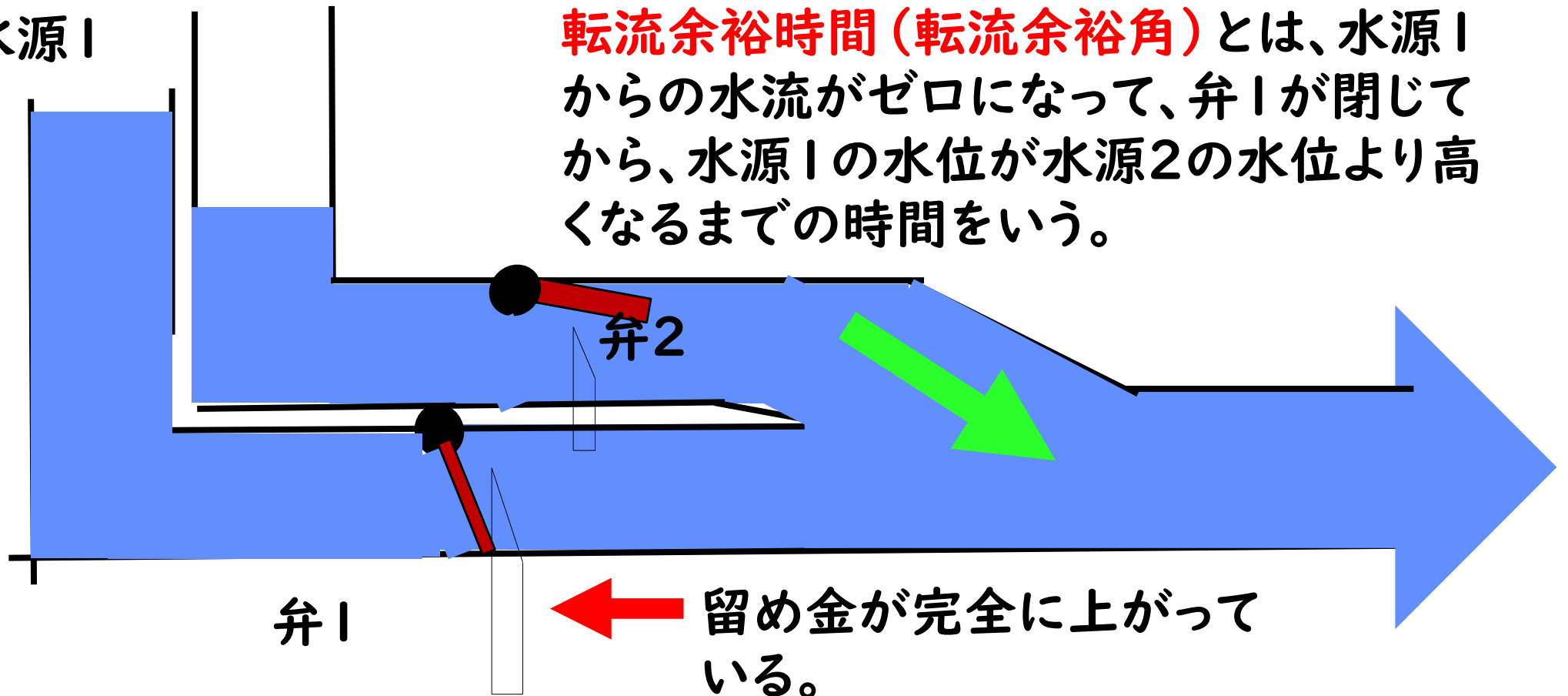


水源2

状態4: 留め金がしっかり上がれば、水源1の水位が水源2の水位が高くなって、弁1が再び開いてしまうことはない。

転流余裕時間 (転流余裕角)とは、水源1からの水流がゼロになって、弁1が閉じてから、水源1の水位が水源2の水位より高くなるまでの時間をいう。

水源1

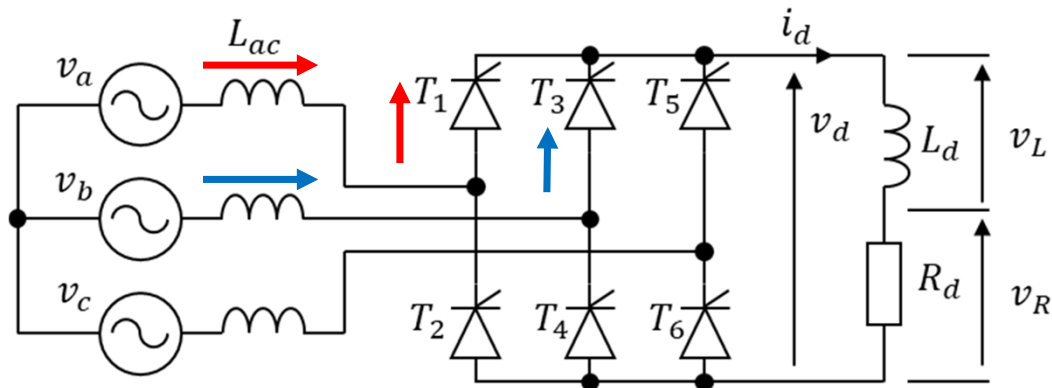


弁1

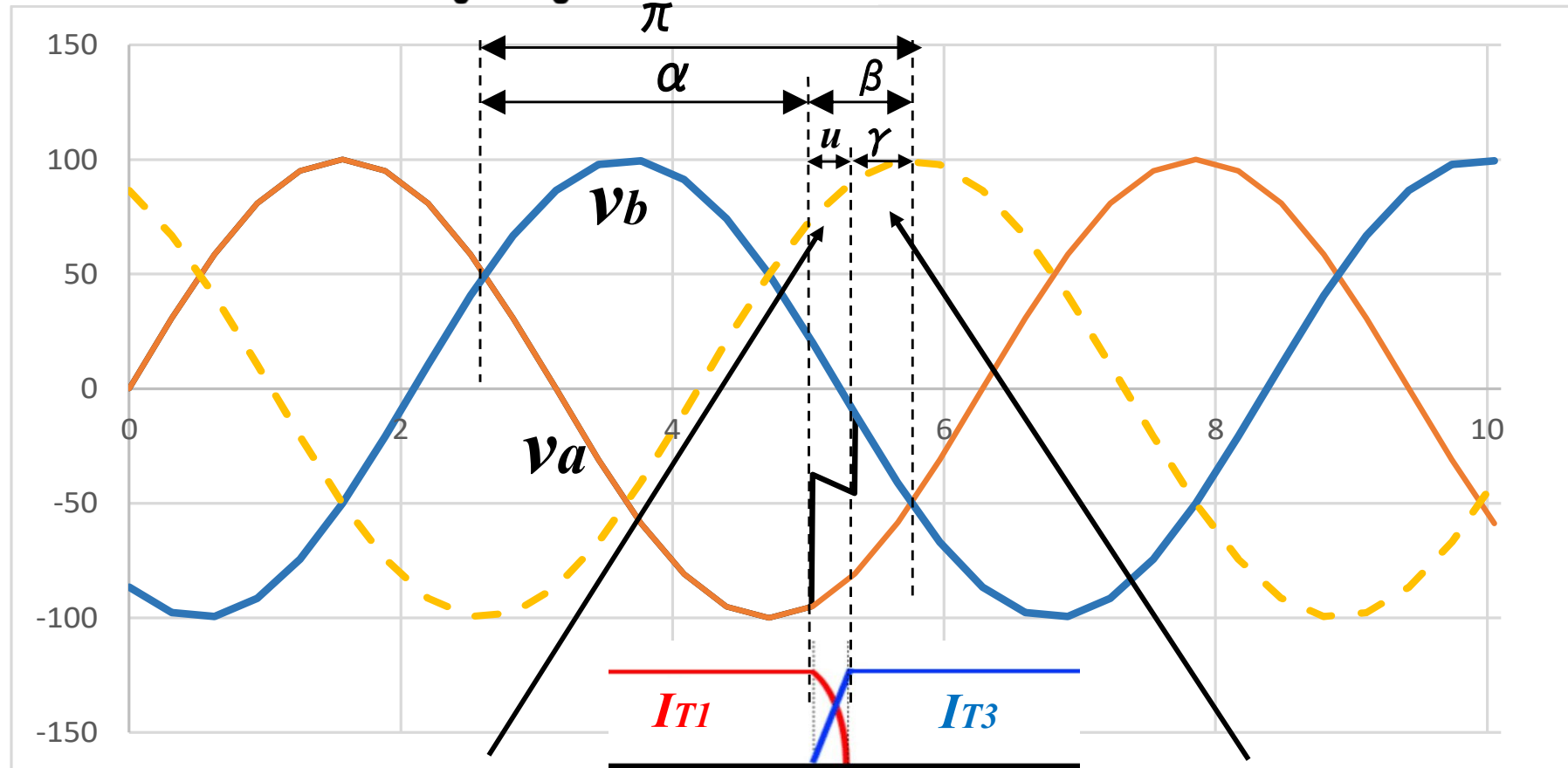


留め金が完全に上がっている。

重なり角 u , 余裕角 γ と $A\gamma R$



$$\{\cos \alpha - \cos(\alpha + u)\} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{X_s}{V_s} I_d$$

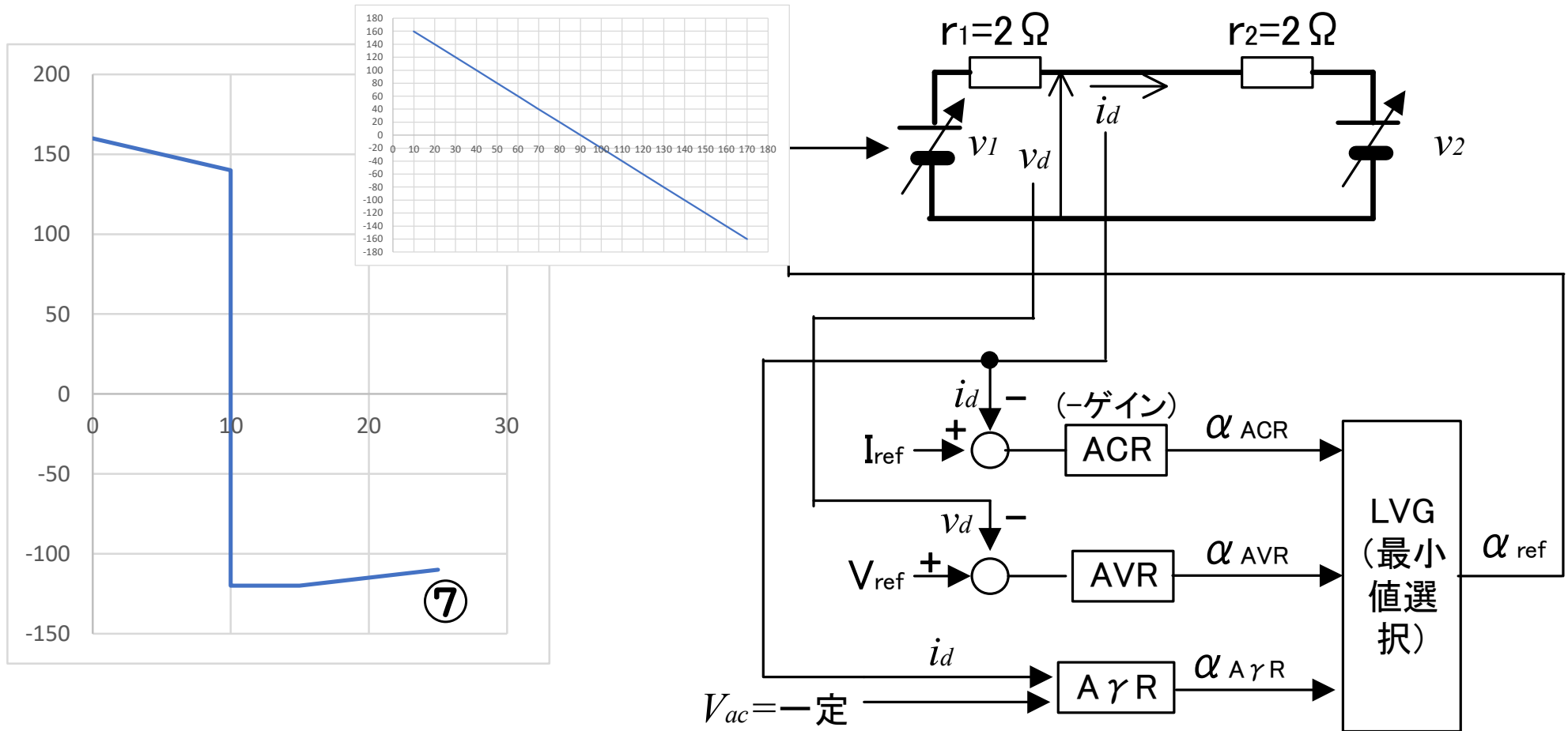


転流重なり角 u

転流余裕角 γ



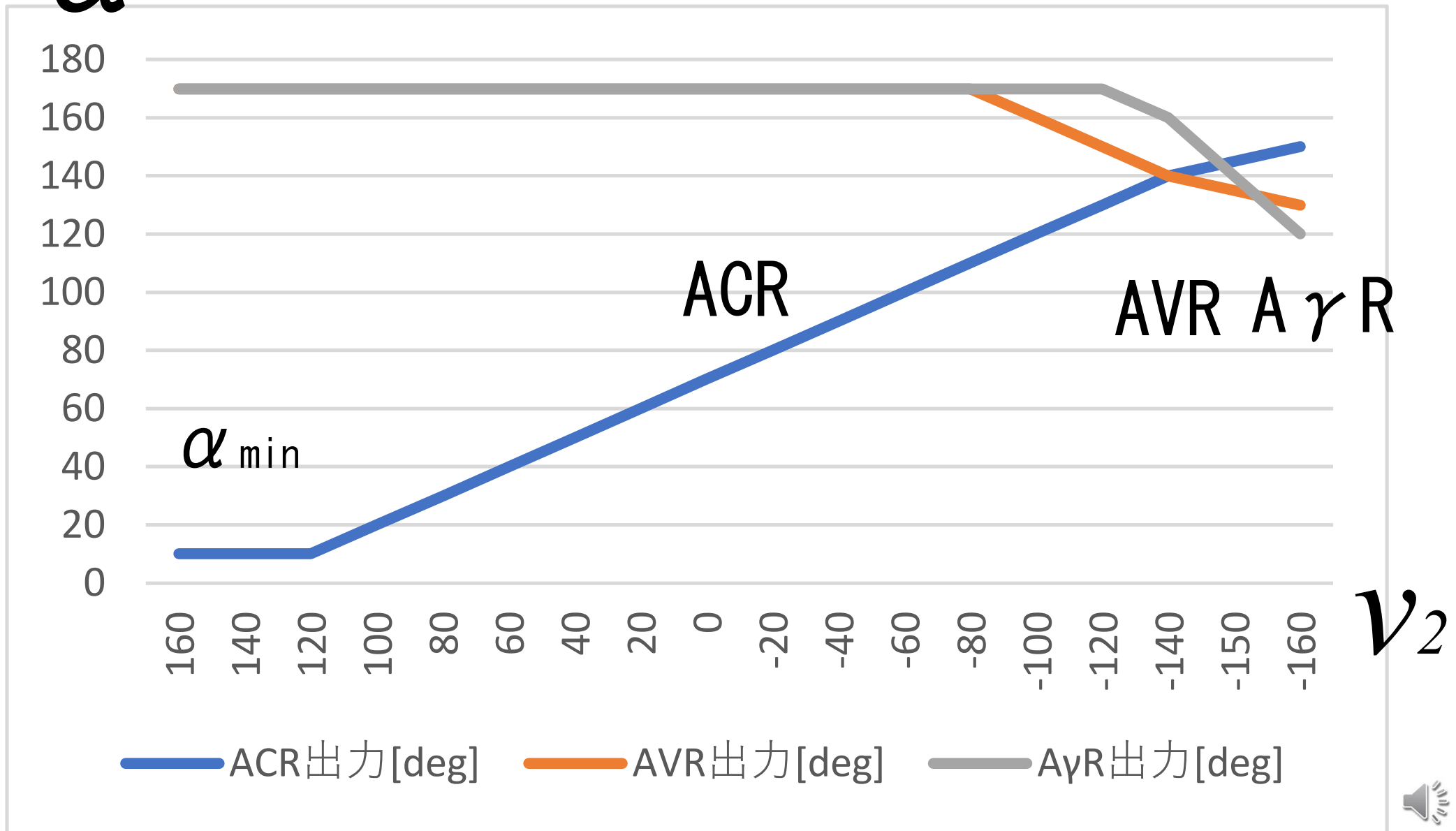
他励変換器のV-I特性



⑦ $V_2 = -160\text{V}$ の時、AVRは V_1 を -80V ($\alpha = 130^\circ$) にして $v = -120\text{V}$ としようとする。しかし、 $A\gamma R$ は転流余裕角を確保するために、 $\alpha = 120^\circ$ を出力する。 120° の方が小さいので $A\gamma R$ が選択され、 $V_1 = -60\text{V}$ となり、 $v_d = -110\text{V}$, $i_d = 25\text{A}$ となる。

各制御指令の変化

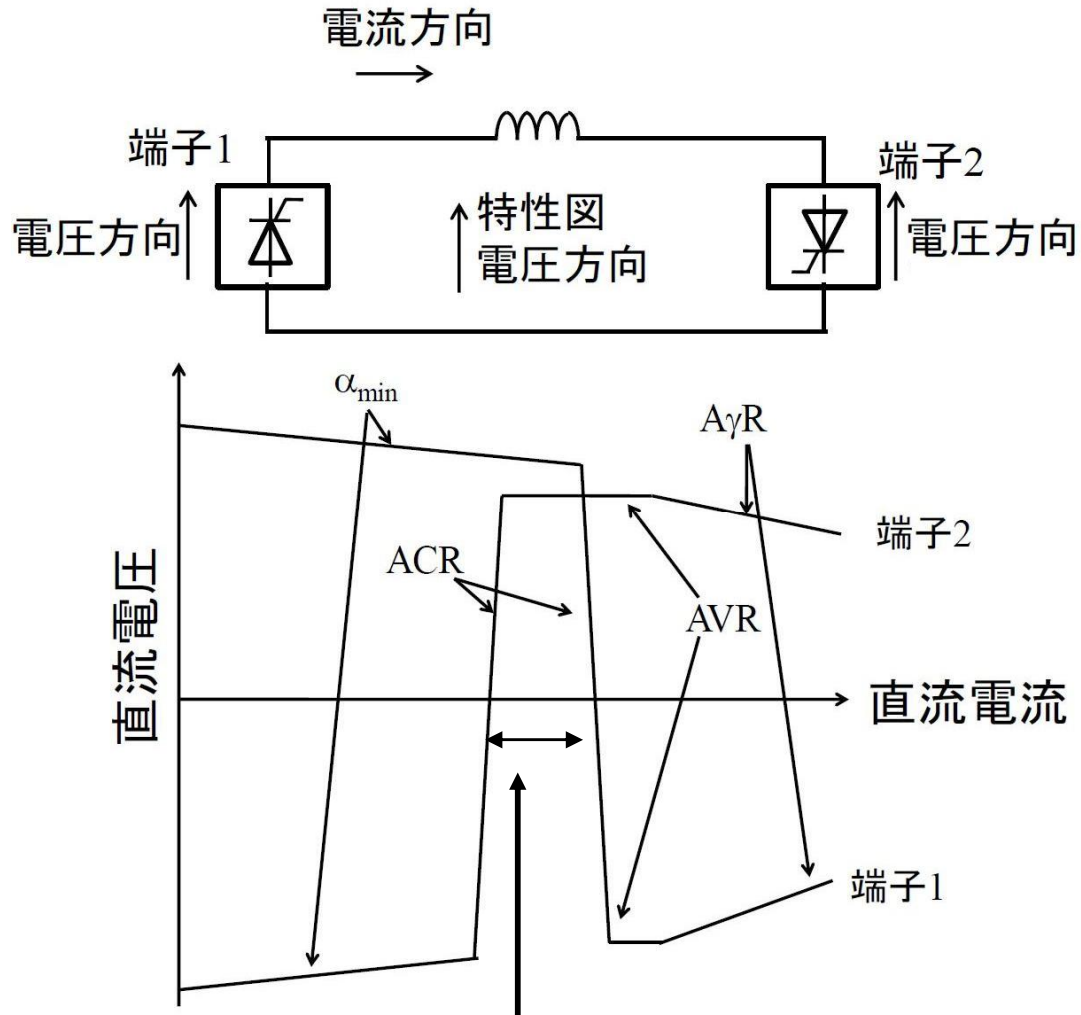
α



電流マージン（潮流反転）、APR, AFC、
VDCOL, EPPS



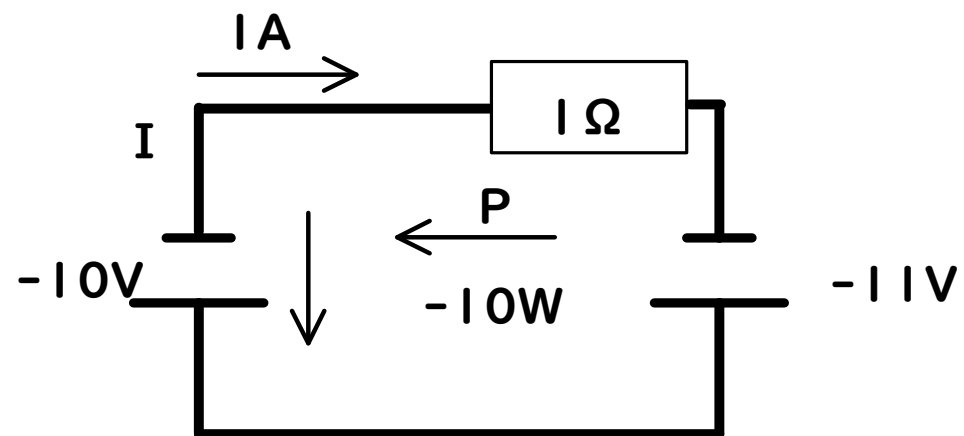
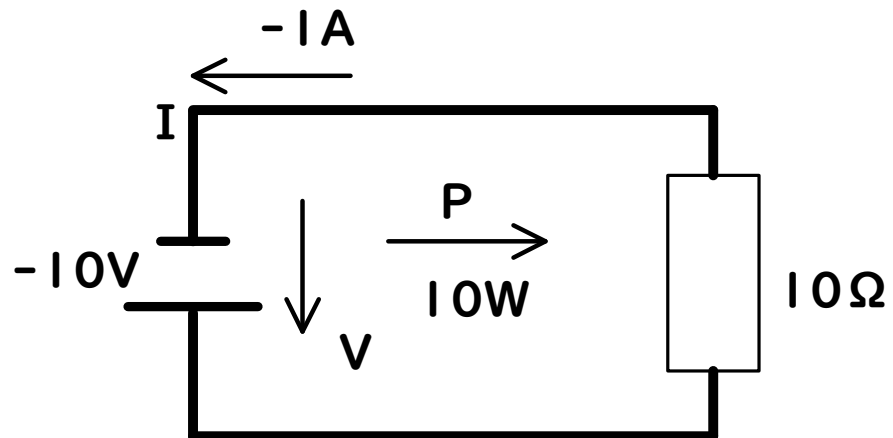
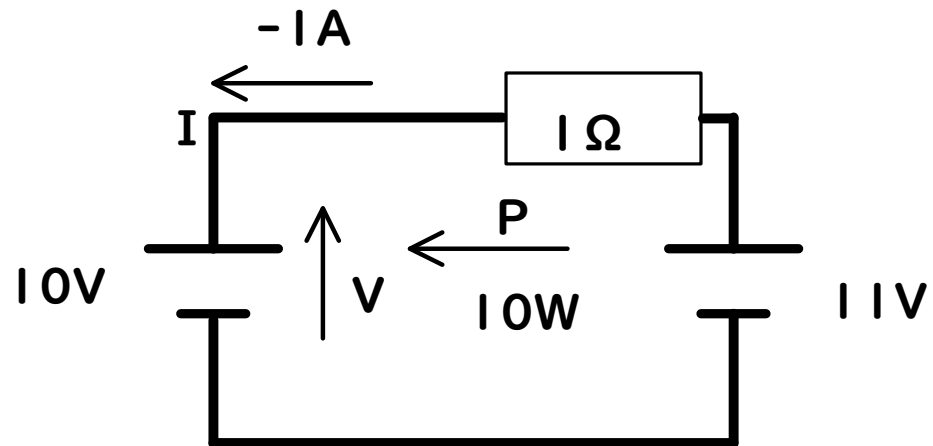
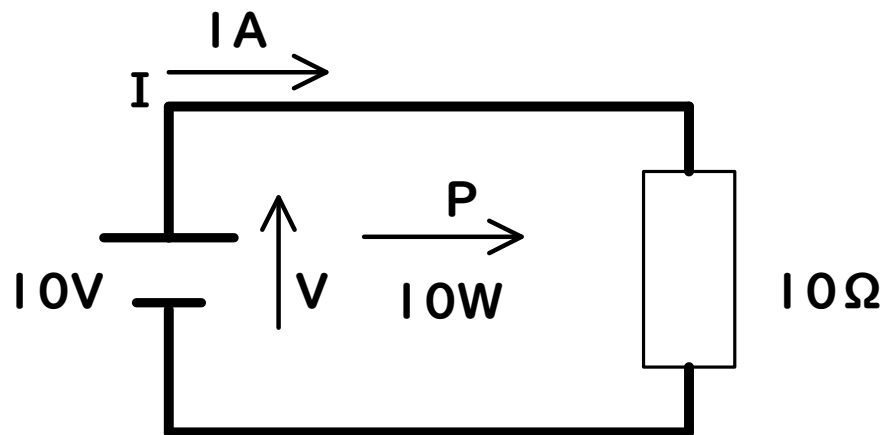
他励HVDC 電流マージン



2つの変換器は装置も設定も同じ。ただ、電流マージンの有無が異なるだけ

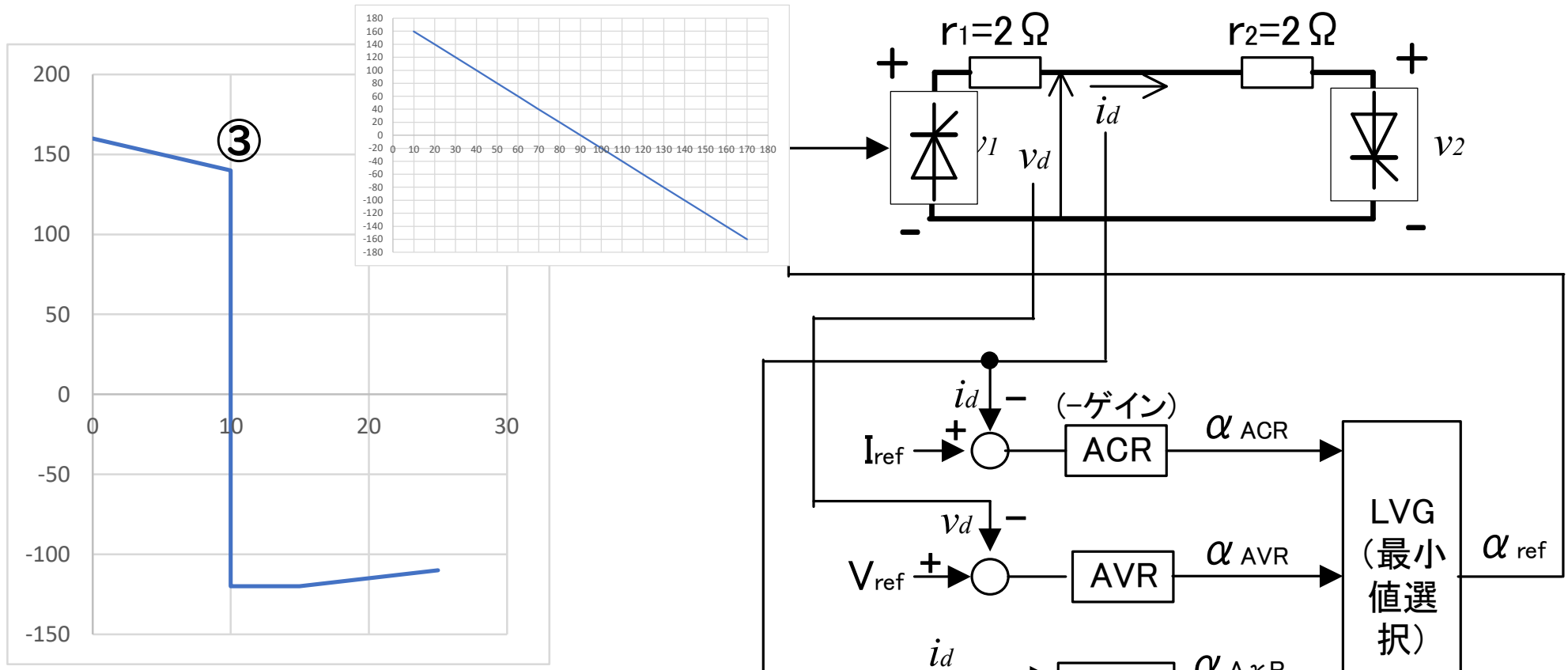
ΔI : 電流マージン





変数 \ ケース	1	2	3	4
V	+	+	-	-
I	+	-	-	+
P	+	-	+	-

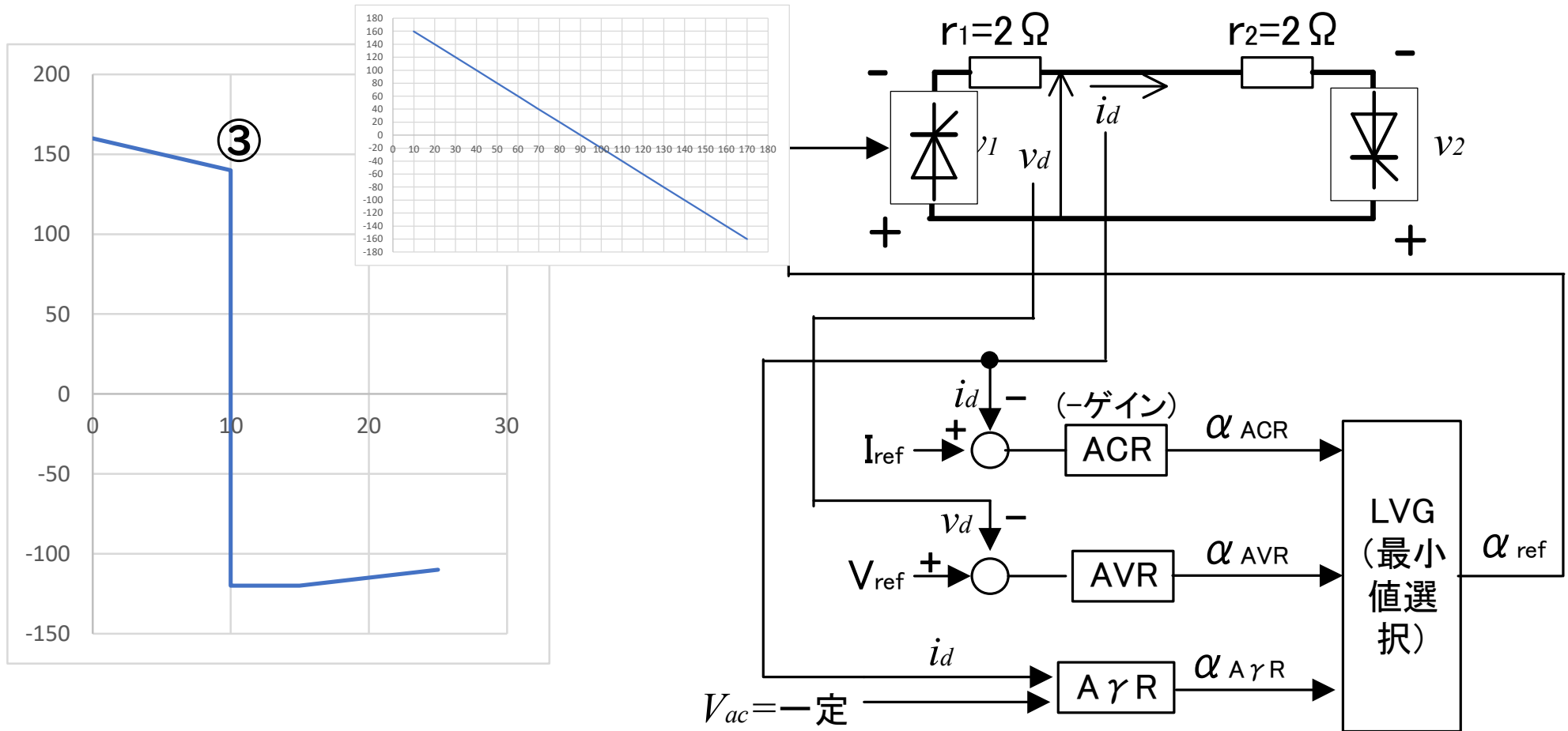
電流マーージンの変化による潮流反転



変換器1の電流指令を10Aから8AにするとACRは電流を10Aから8Aにするため、電圧を下げ電流をさげる。(= α を大きくする)、一方、変換器2の電流指令は8Aから10Aになるので、電流を10Aに維持しようと電圧を上げる。(α を小さくする)



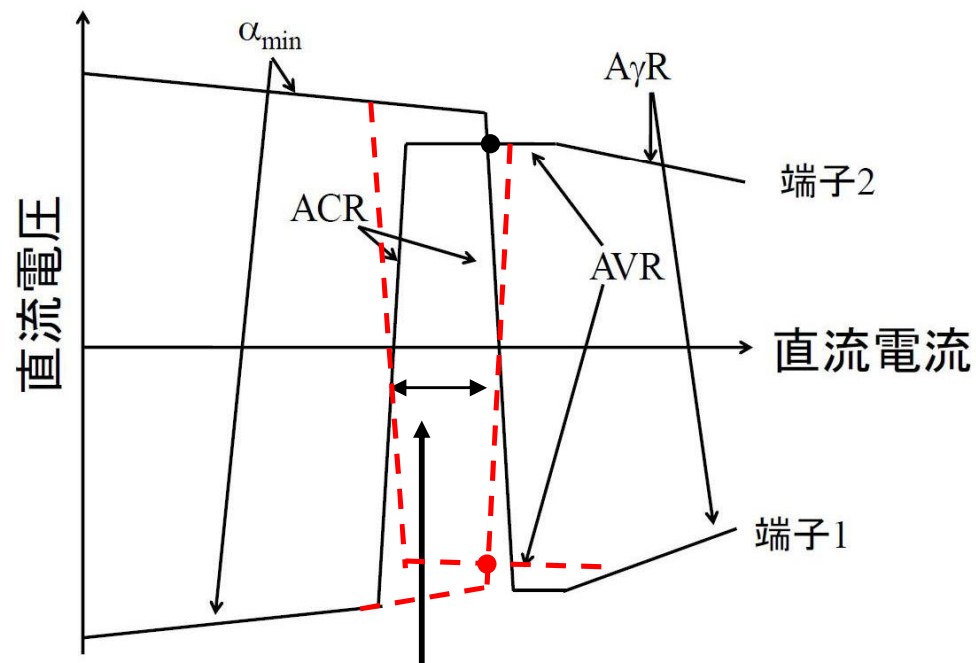
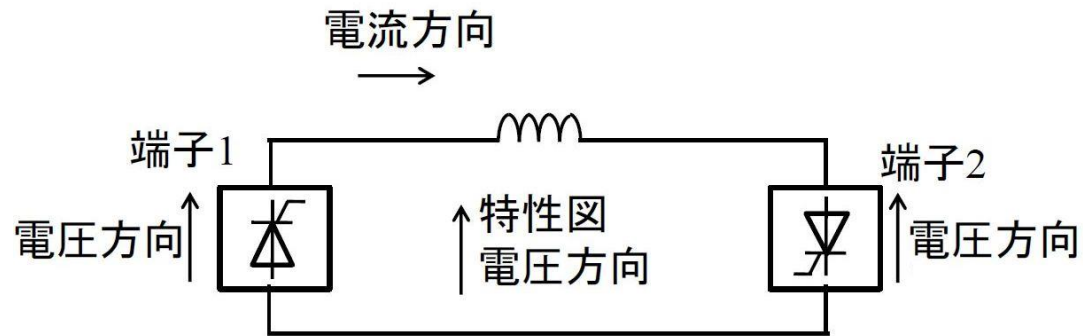
電流マーージンの変化による潮流反転



最終的に変換器1がインバータ運転、変換器2が順変換器運転になり、電力潮流は、右から左に流れることになる。



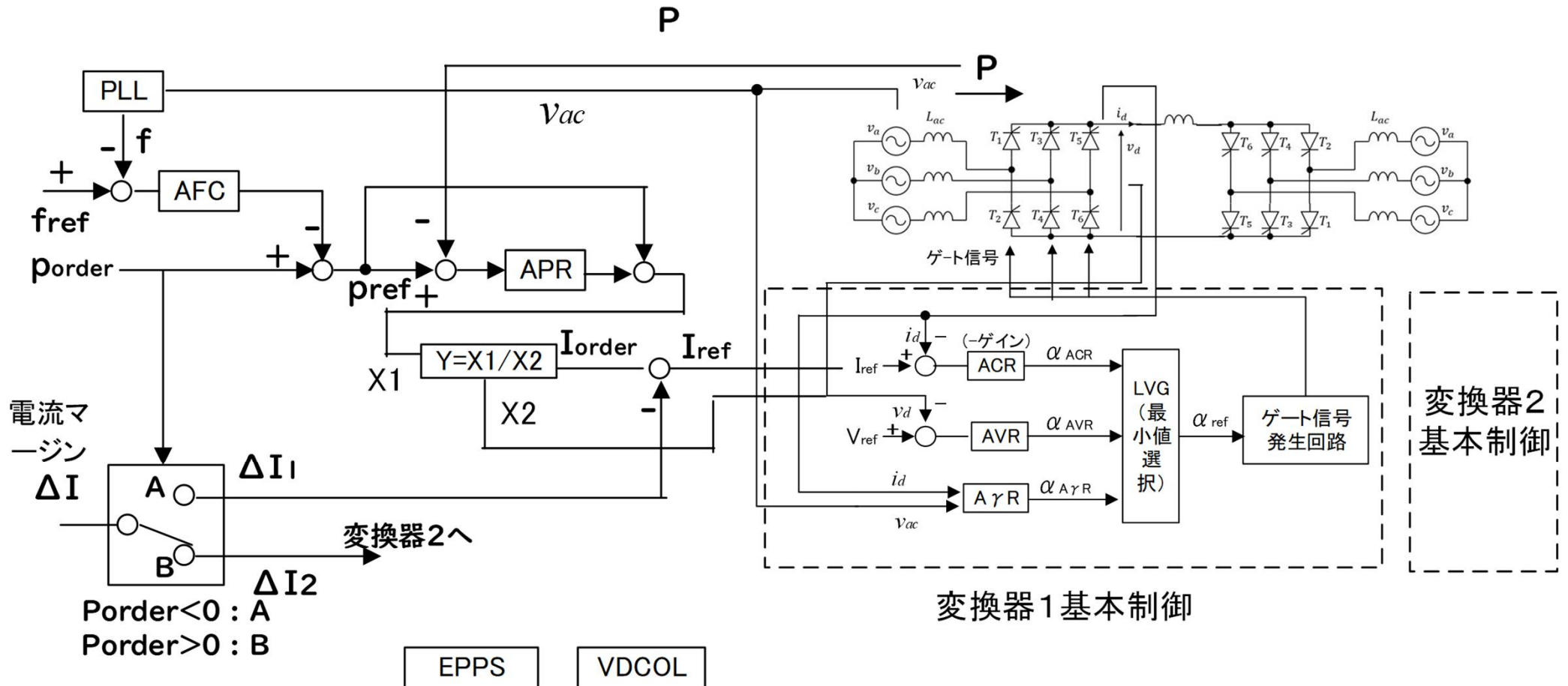
他励HVDC 電流マージン



ΔI : 電流マージン



HVDCのシステム制御 (AFC, APR)



EPPS

EPPS (Emergency Power Presetting Switch)

- ・ 周波数変換設備 (FC) により連系されている一方のエリアにおいて、系統故障等により電源が脱落し周波数があらかじめ設定した値を下回った場合、もう一方のエリアの周波数が健全であることを条件に、あらかじめ設定した電力を瞬時に送電する機能
- ・ 新信濃1FC, 2FC, 佐久間FC, 東清水FCの4台に機能を具備
- ・ 最大で60万kW (3段階に分けて) の電力を送電可能



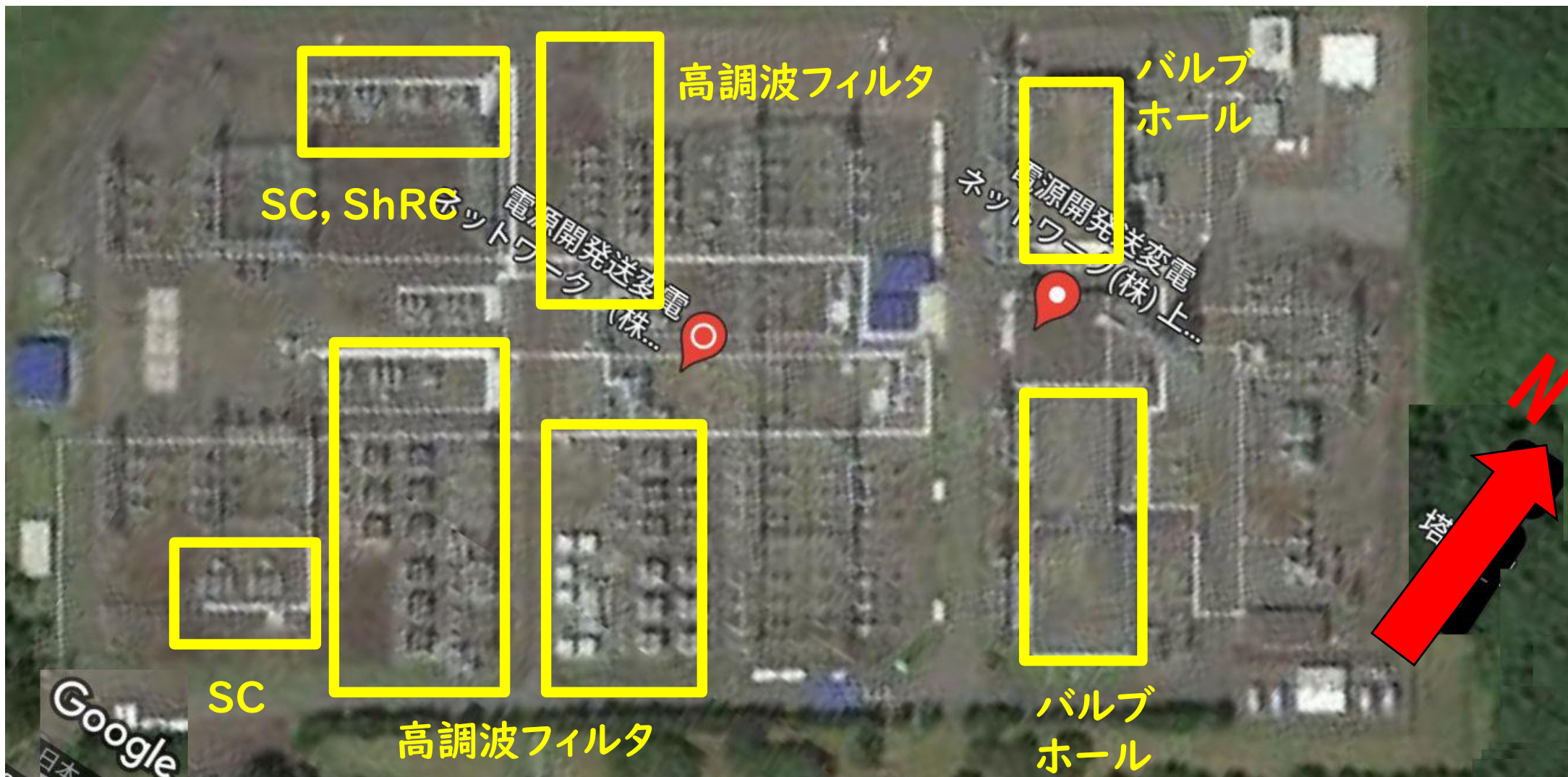
VDCOL

VDCOL (Voltage Dependent Current Order Limiter)

- ・ 直流送電系故障で直流電圧が低下した場合に、HVDCの電流指令値を下げて直流電流を低下させ、故障回復を支援する制御



他励HVDCの調相設備制御



他励HVDCは有効電力しか制御できないので
無効電力は調相設備の入り切りで制御する



(2) 自励HVDC



自励変換器の電力分野導入は日本が先行していた

1980

- **1980s** サイリスタを使った自励無効電力補償装置 77kV 20MVA SVG プロトタイプ

1990

1991
犬山SVG (現STATCOM) 世界初の電力用自励変換器
80MVA 4インチGTO



2000

1999
ABB HVDC light
Westinghouse INEZ UPFC



新信濃自励三端子BTB 53MVA 6インチGTO

その後、北米に STATCOM 輸出





祝 新信濃変電所 高性能交直変換器実証試験設備
世界初 3端子直流連系運転記念 1999年1月10日



自励HVDCの2つの主要技術

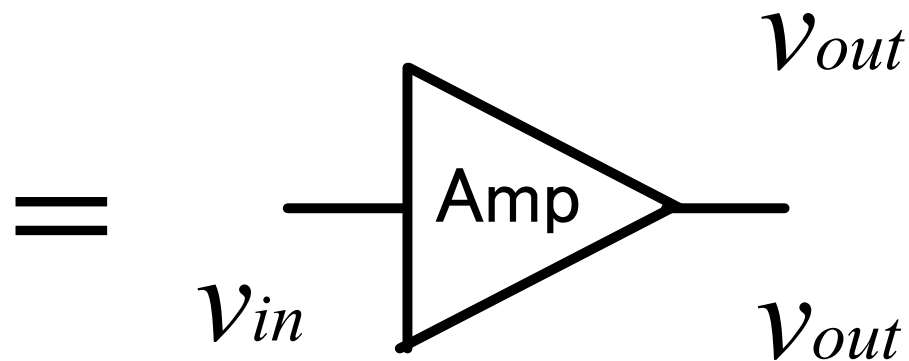
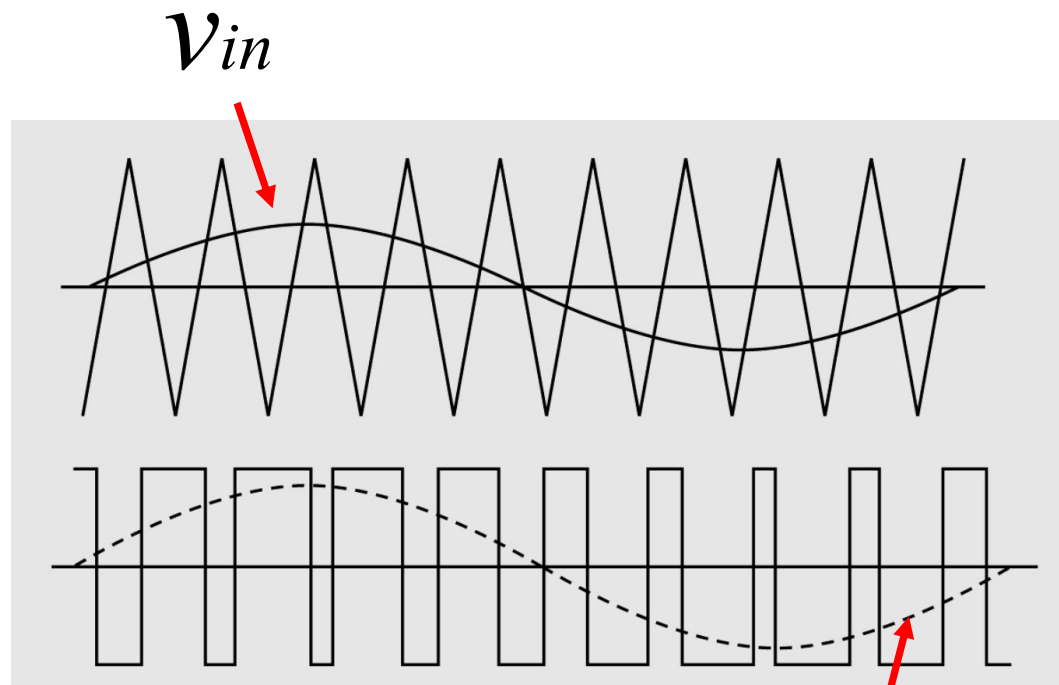
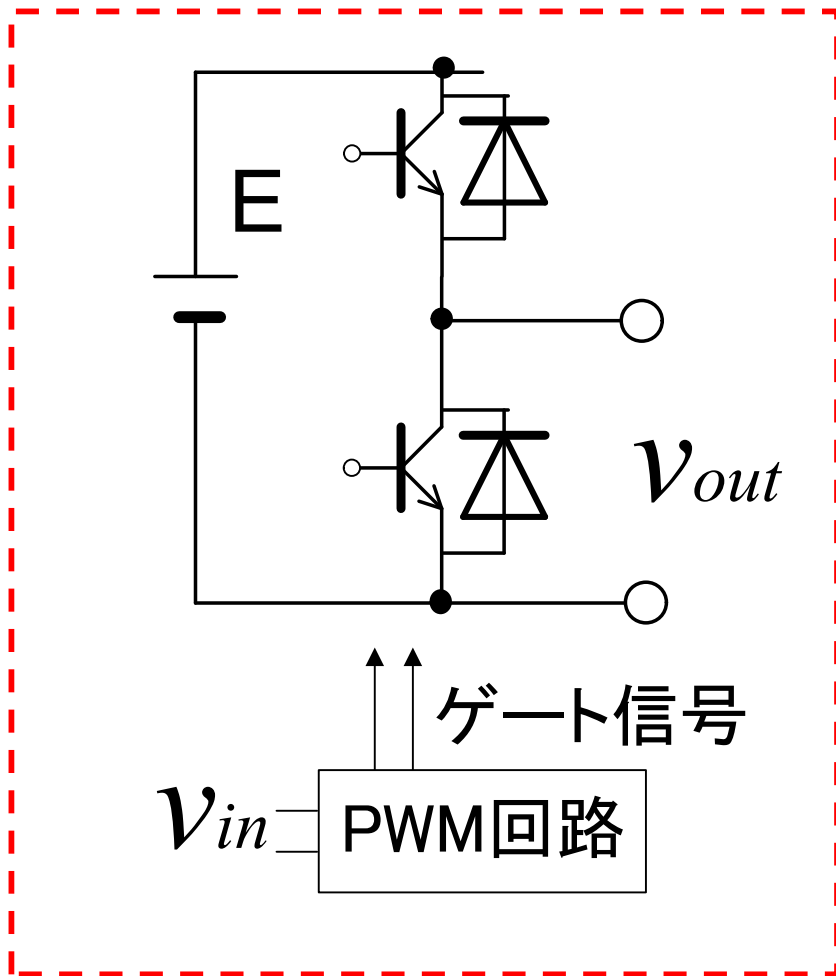
① PWM インバータ技術

= (大きなアンプ)

② dq変換制御

=モータ制御用に開発されたベクトル制御技術

PWM回路 + 変換器 = 増幅器



dq変換



回転している扇風機のプロペラの微妙なゆらぎは観測することができない。どうしたらよいか？

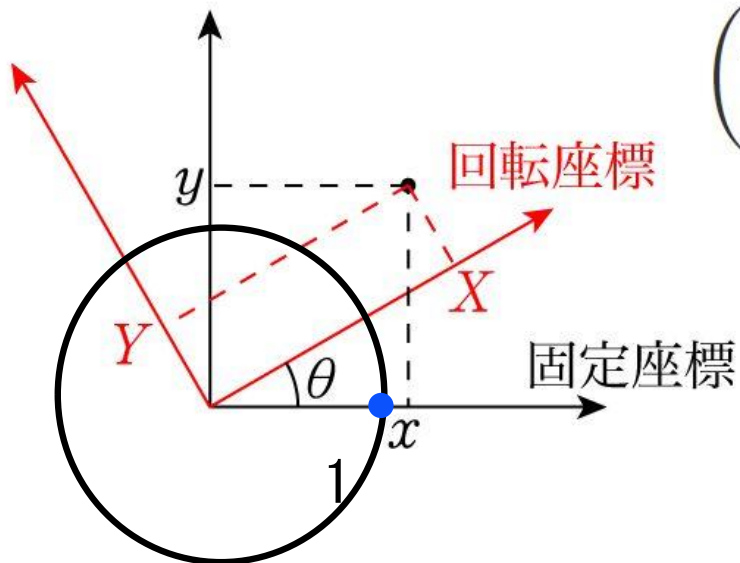


dq変換



自分もプロペラと同じ回転速度で回転する回転盤に乗って観測すればプロペラは止まって見え、微妙なゆらぎも観測できる。

数学的な説明（数学の嫌いな人は聞き流してOK）



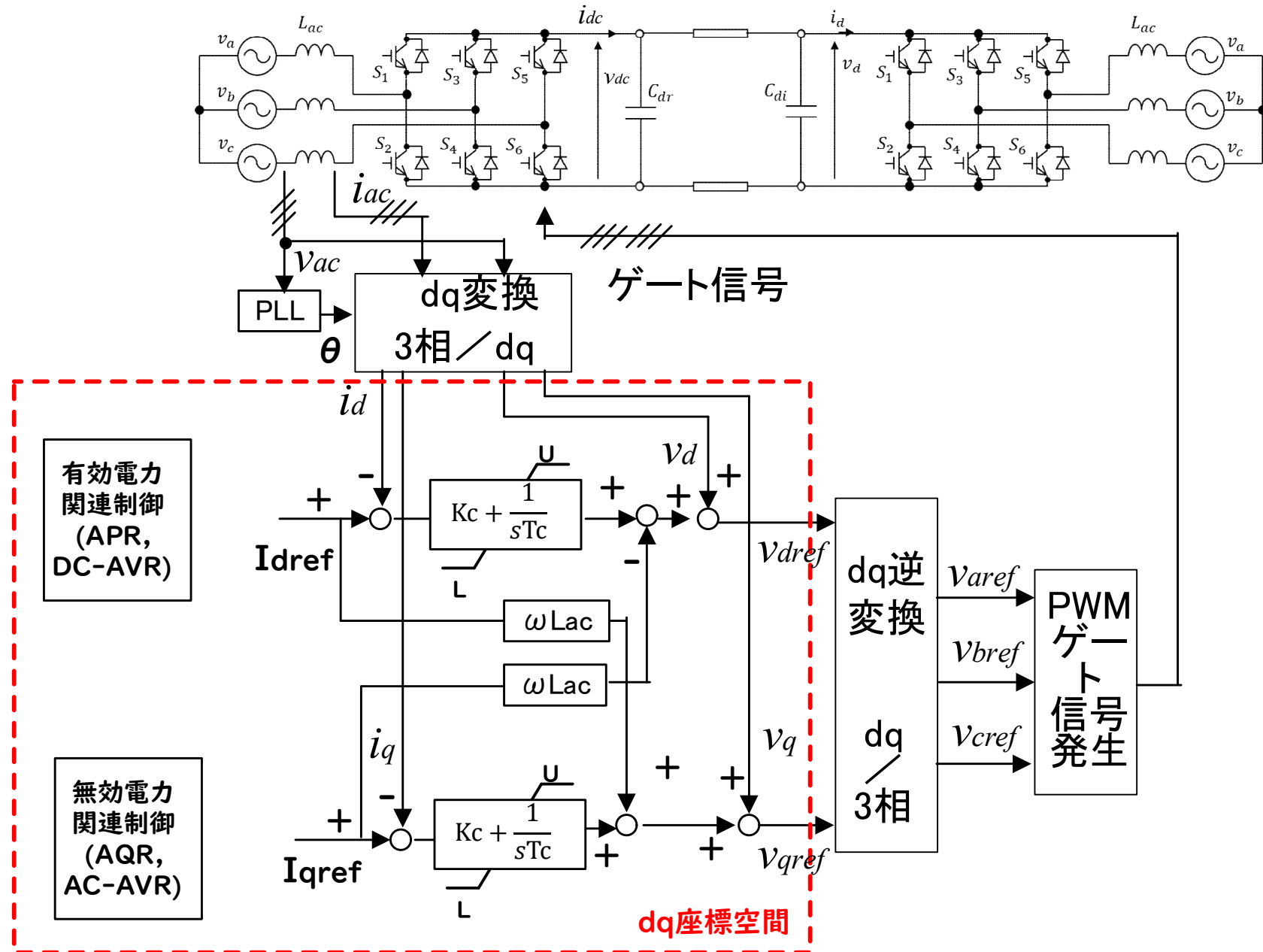
$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} x \cos \theta + y \sin \theta \\ -x \sin \theta + y \cos \theta \end{pmatrix}$$

半径1の円周上を角速度 ω で回転する点の座標は

$$x = \cos(\omega t) \quad y = \sin(\omega t)$$

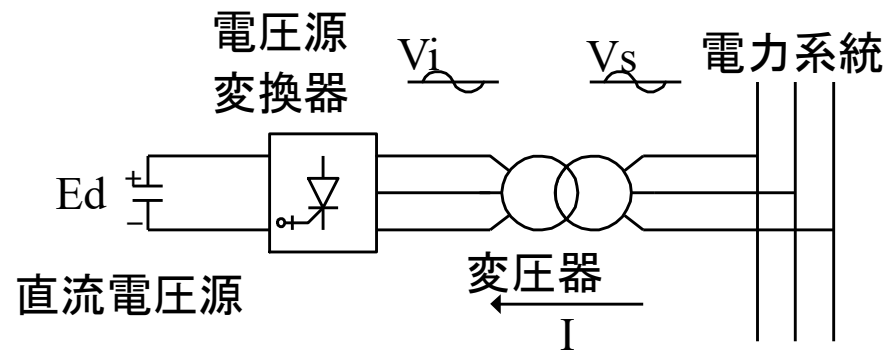
と変化するが、同じ角速度 ω で回転する座標に変換すると $X=1, Y=0$ となる。

自励HVDCの電流制御 (ACR) (対象は交流電流)

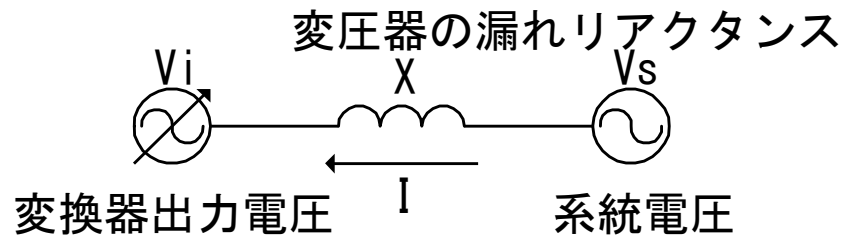


変換器の出力電圧を変化させて電流を制御

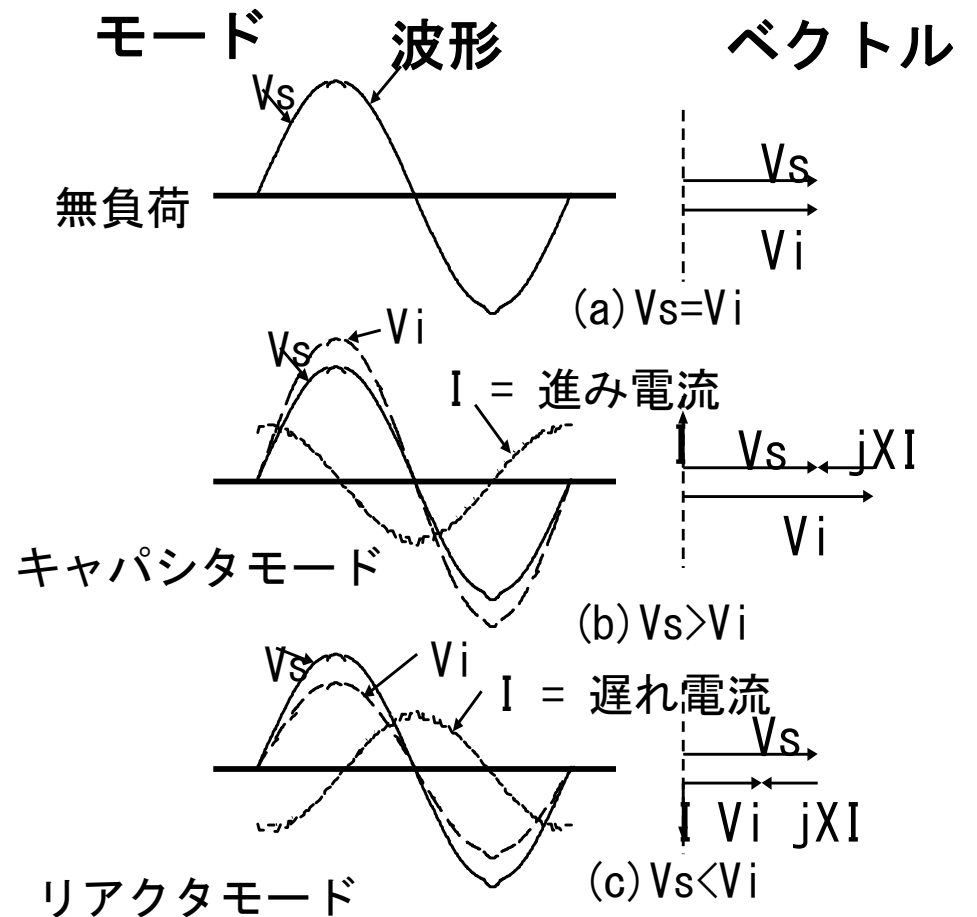
(STATCOMの例)



(a) 基本構成



(b) 等価回路

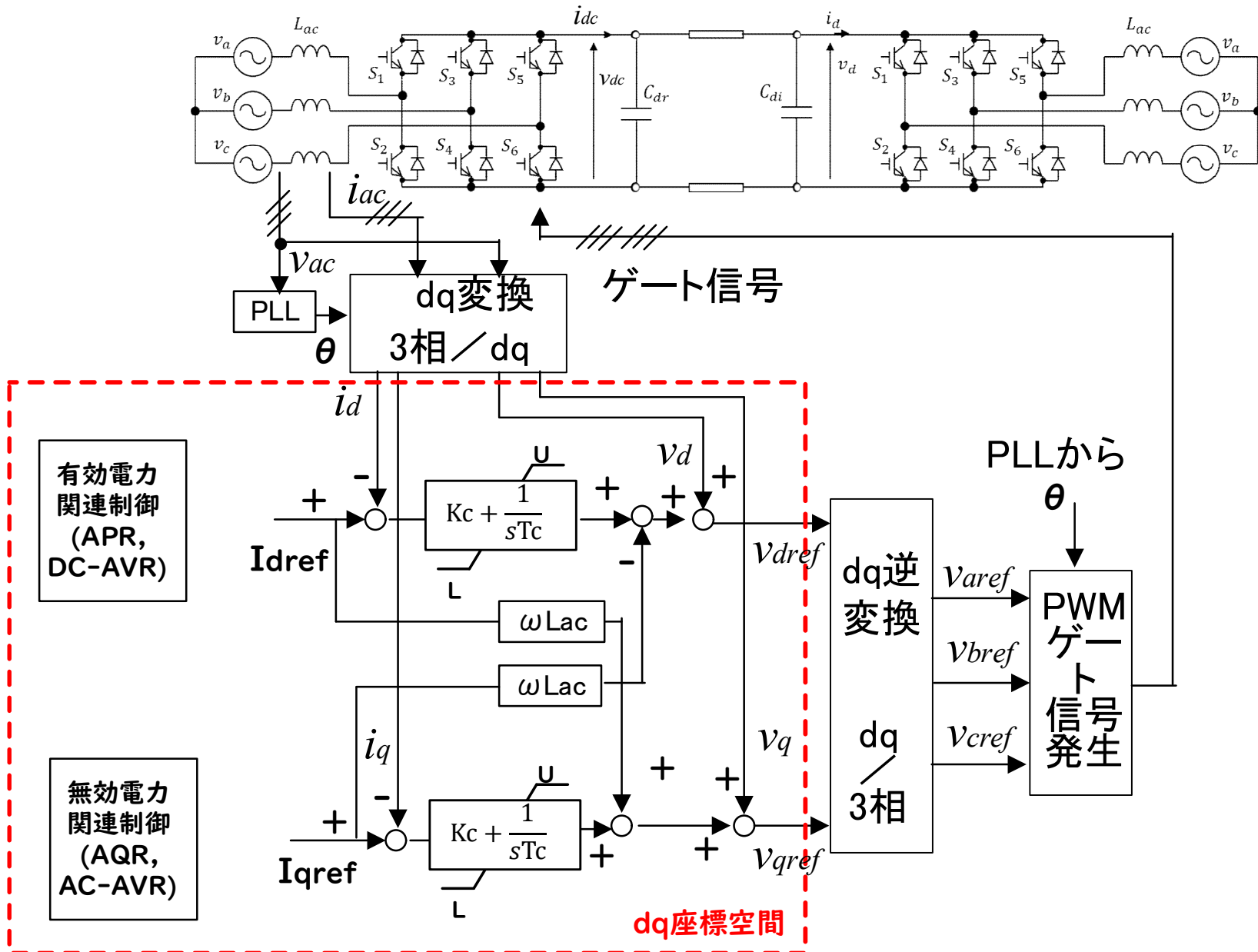


(a) $V_s = V_i$

(b) $V_s > V_i$

(c) $V_s < V_i$

自励HVDCの電流制御 (ACR) (対象は交流電流)

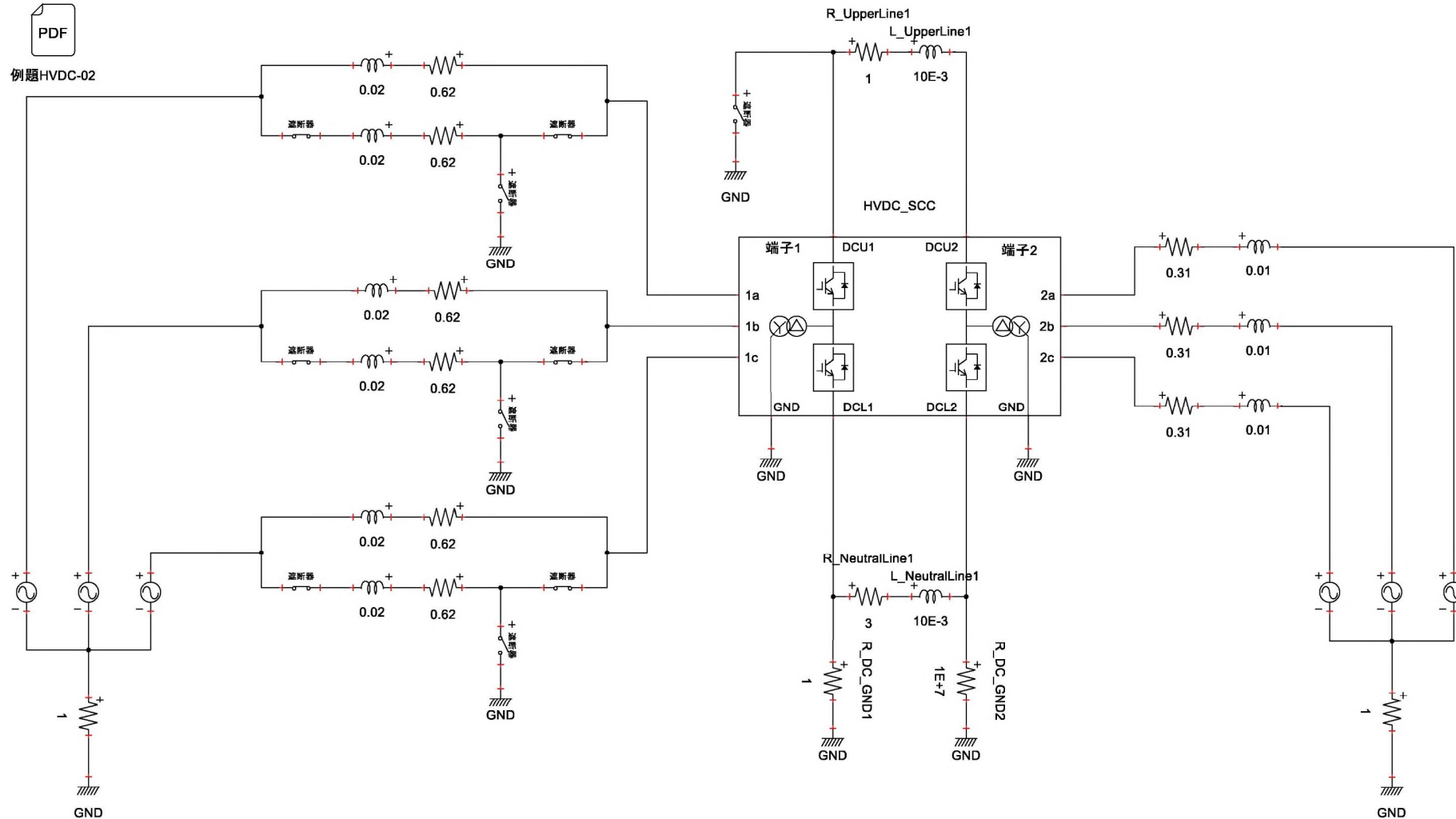


自励HVDCシミュレーション回路

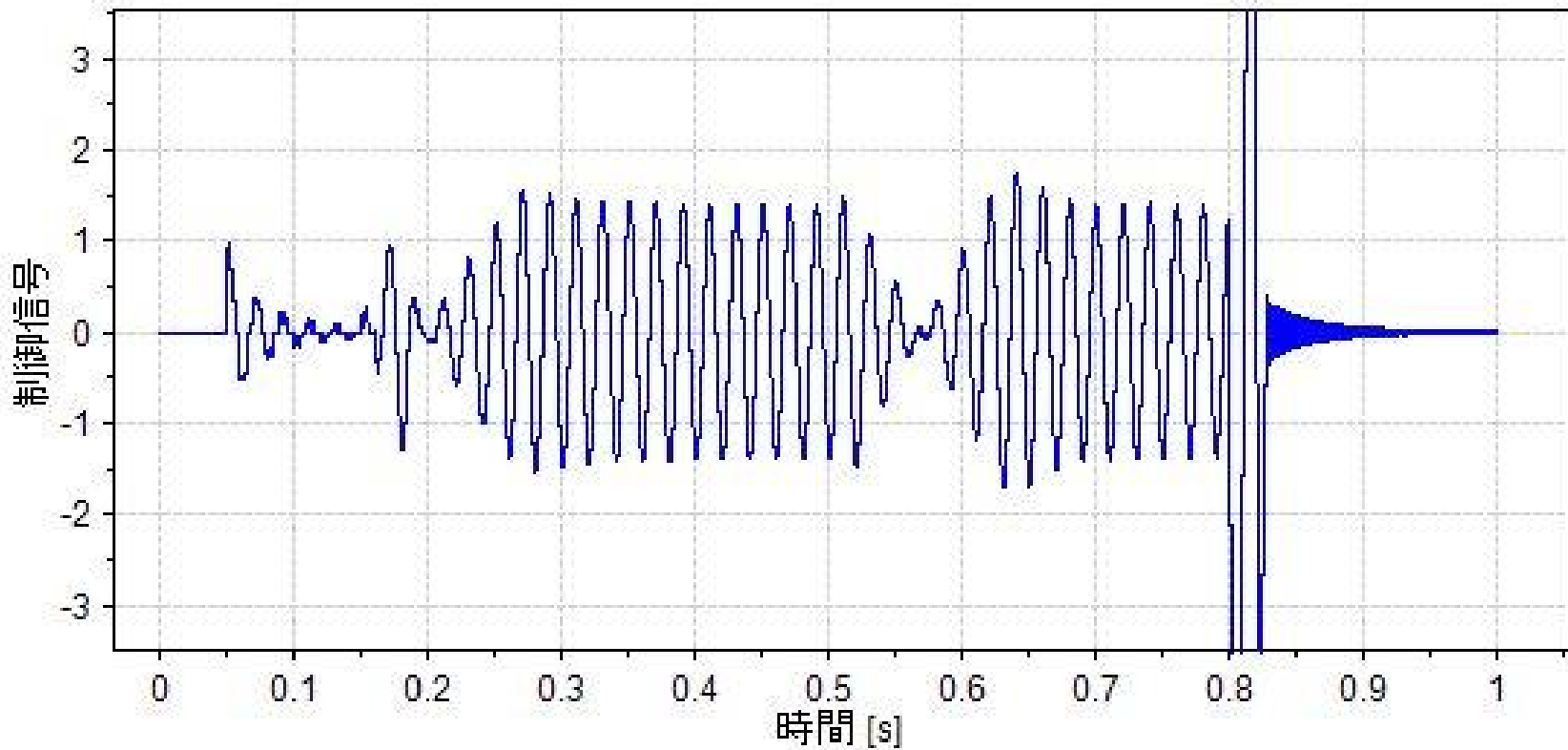
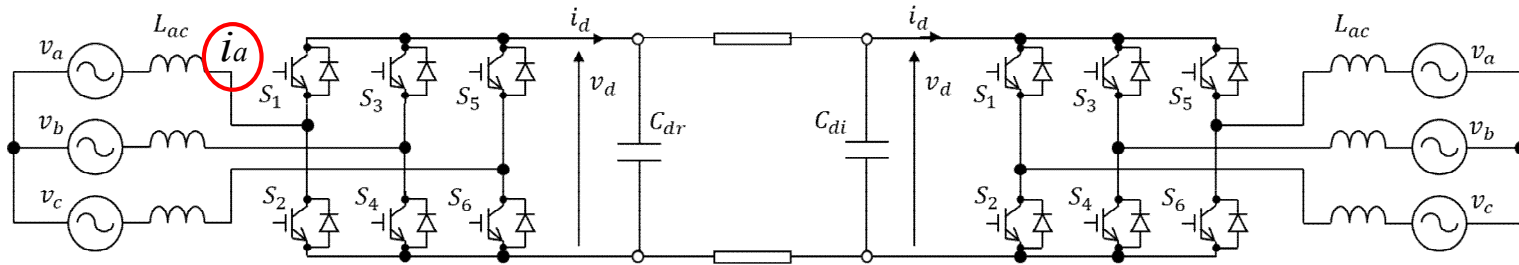
例題名: 自励HVDCモデル 番号: HVDC-02 (例題ファイル: Ver.2.3)



例題HVDC-02



自励HVDCの交流電流

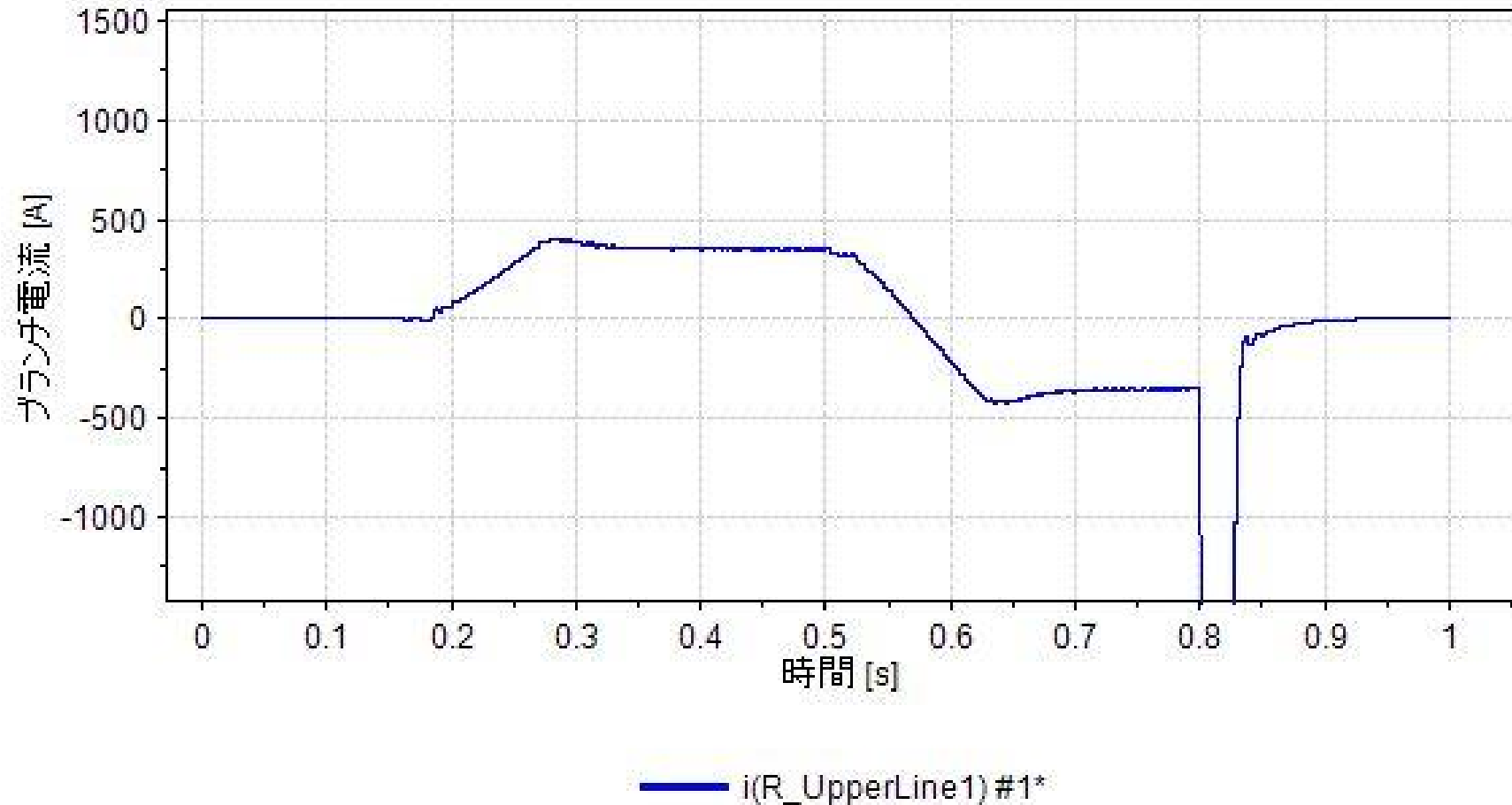


— s(HVDC_SCC/HVDC1A/A_INV) #1*



自励HVDCの直流電流

VSC-HVDC Idc 231018

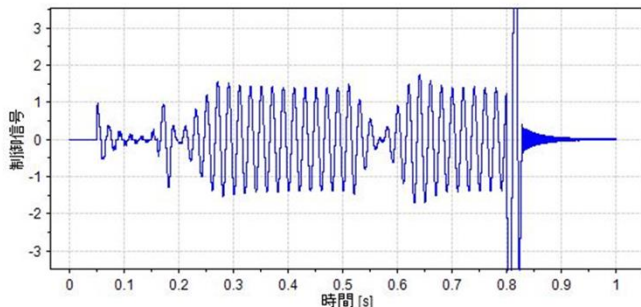


d軸電流を制御することで直流電流を制御できる

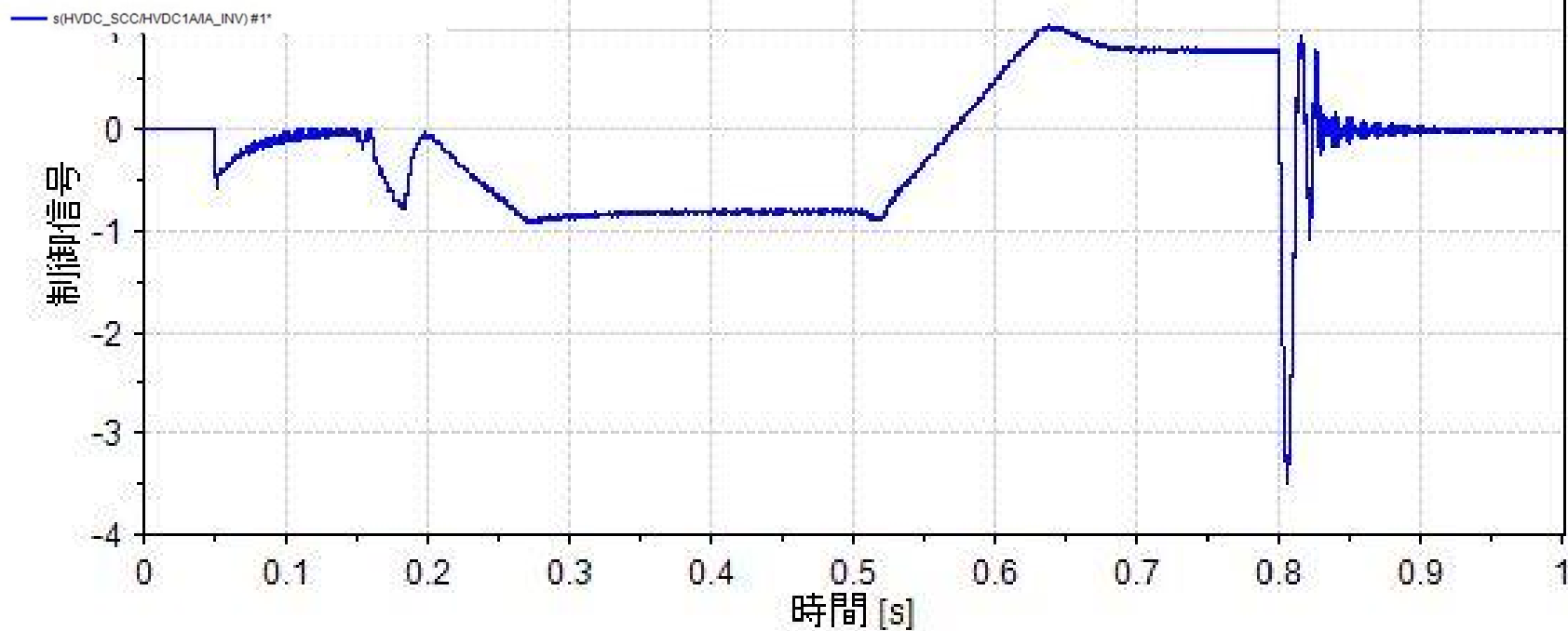


自励HVDCのd軸電流

VSC-HVDC Iac 231018



交流電流をdq変換して得たd軸電流 i_d

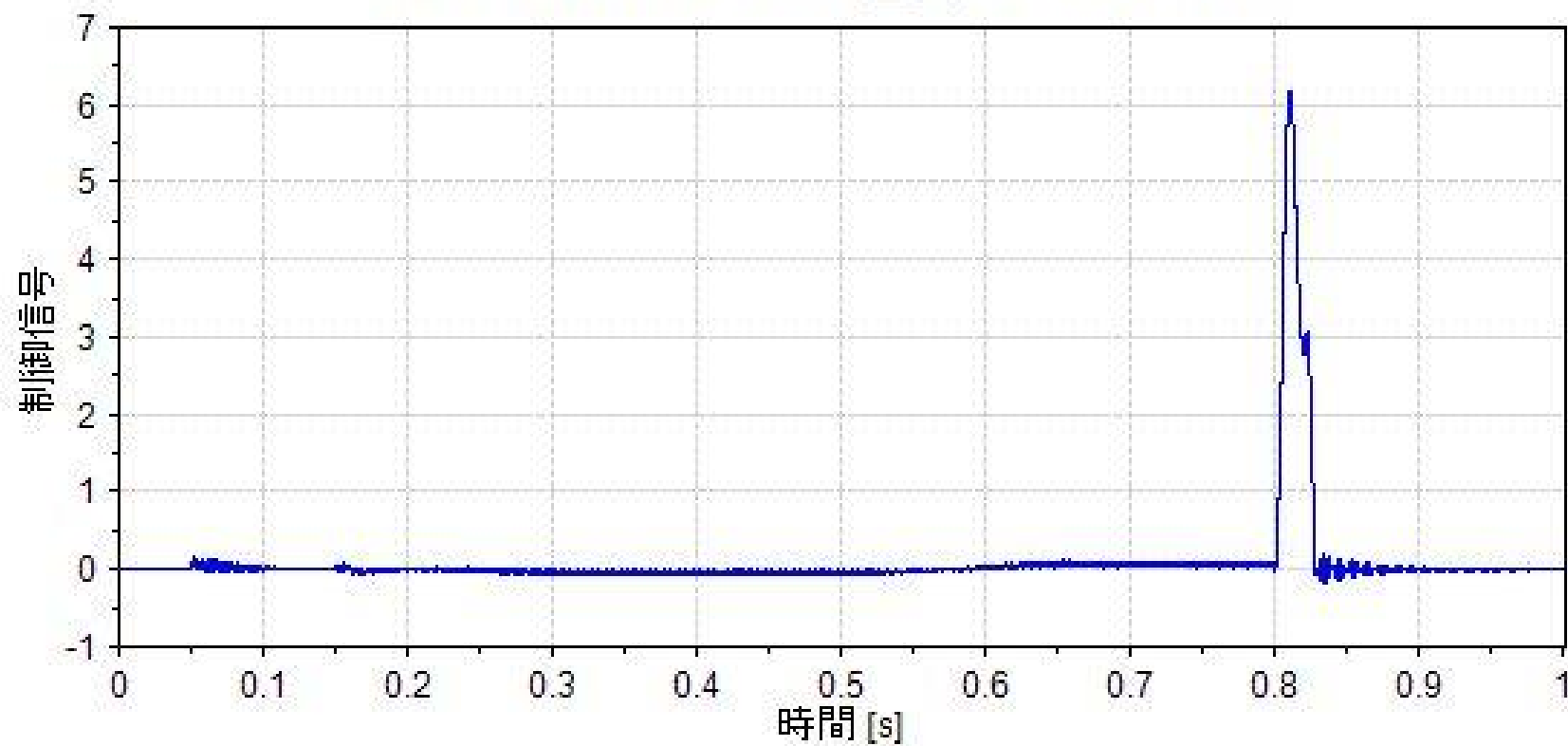


s(HVDC_SCC/HVDC1A/ID_INV)#1*



自励HVDCのq軸電流

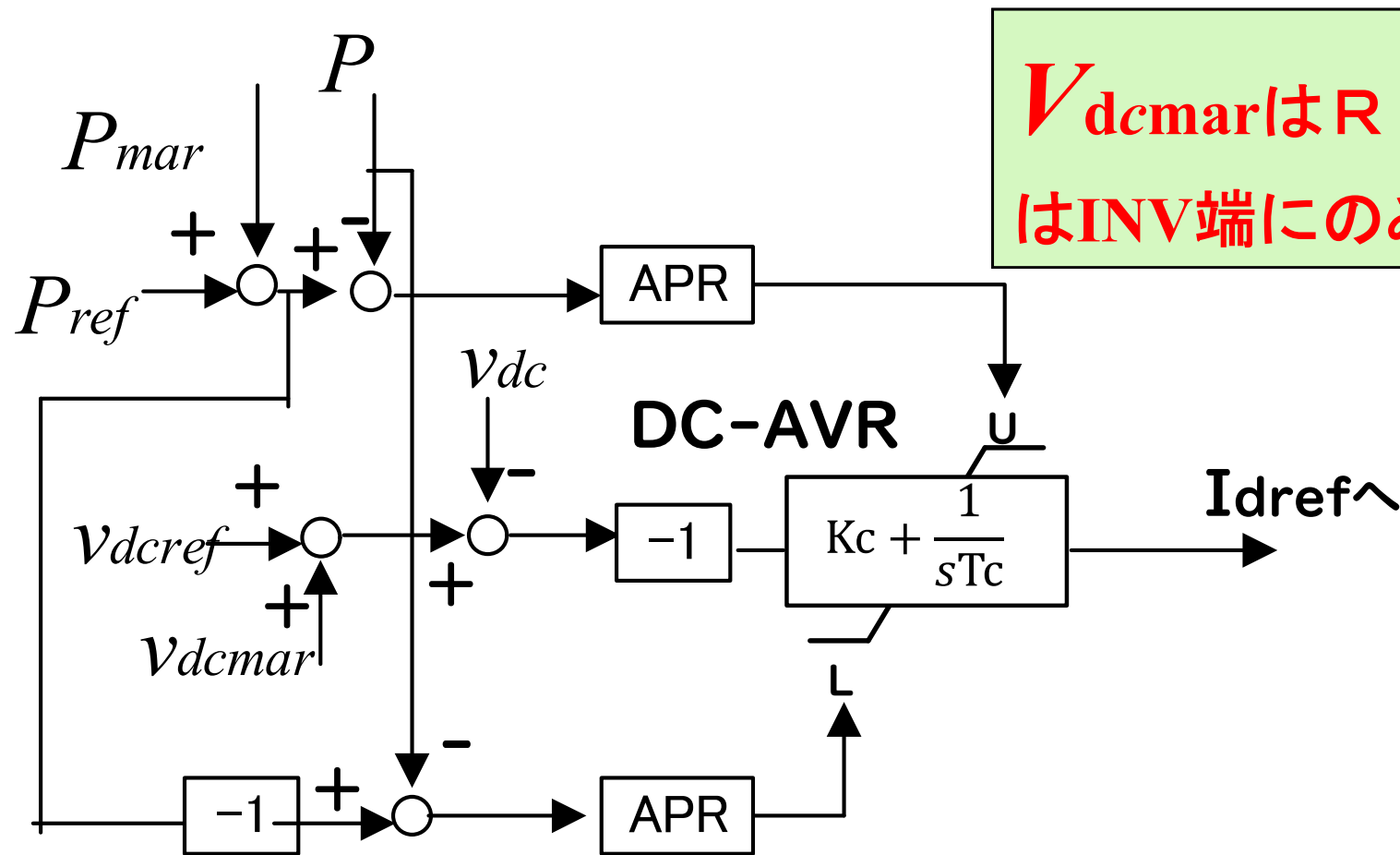
VSC-HVDC Idq_q 231018



s(HVDC_SCC/HVDC1A/IQ_INV) #1*



自励HVDCのAPRとDC-AVR (d軸)



V_{dcmar} はREC端に P_{mar} はINV端にのみ設置される。

参考文献：菊間、高崎：「他励式変換器と自励式変換器併設時の高調波不安定現象」電力中央研究所報告R12010，平成25年7月



自励HVDCの動作点

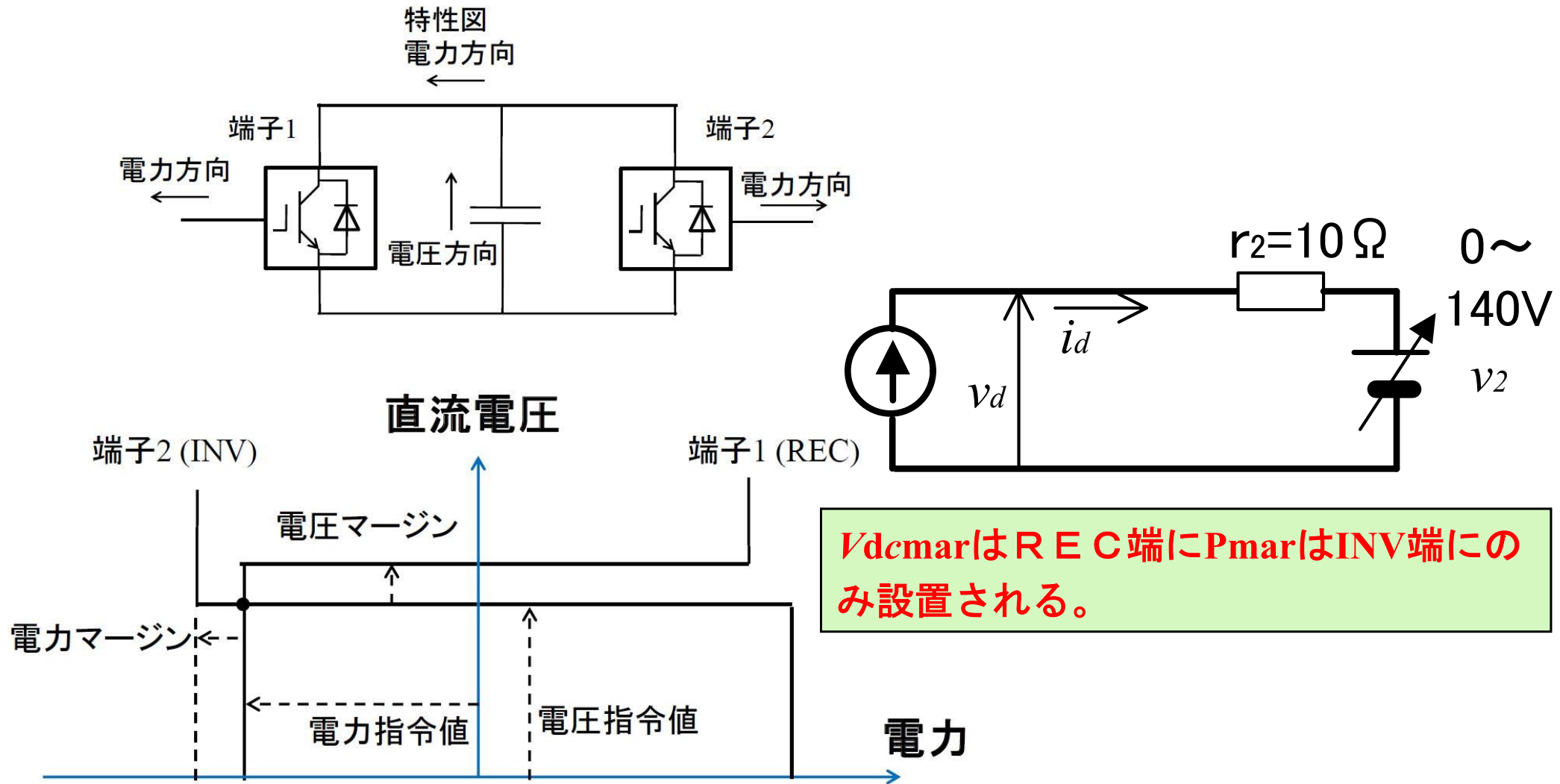
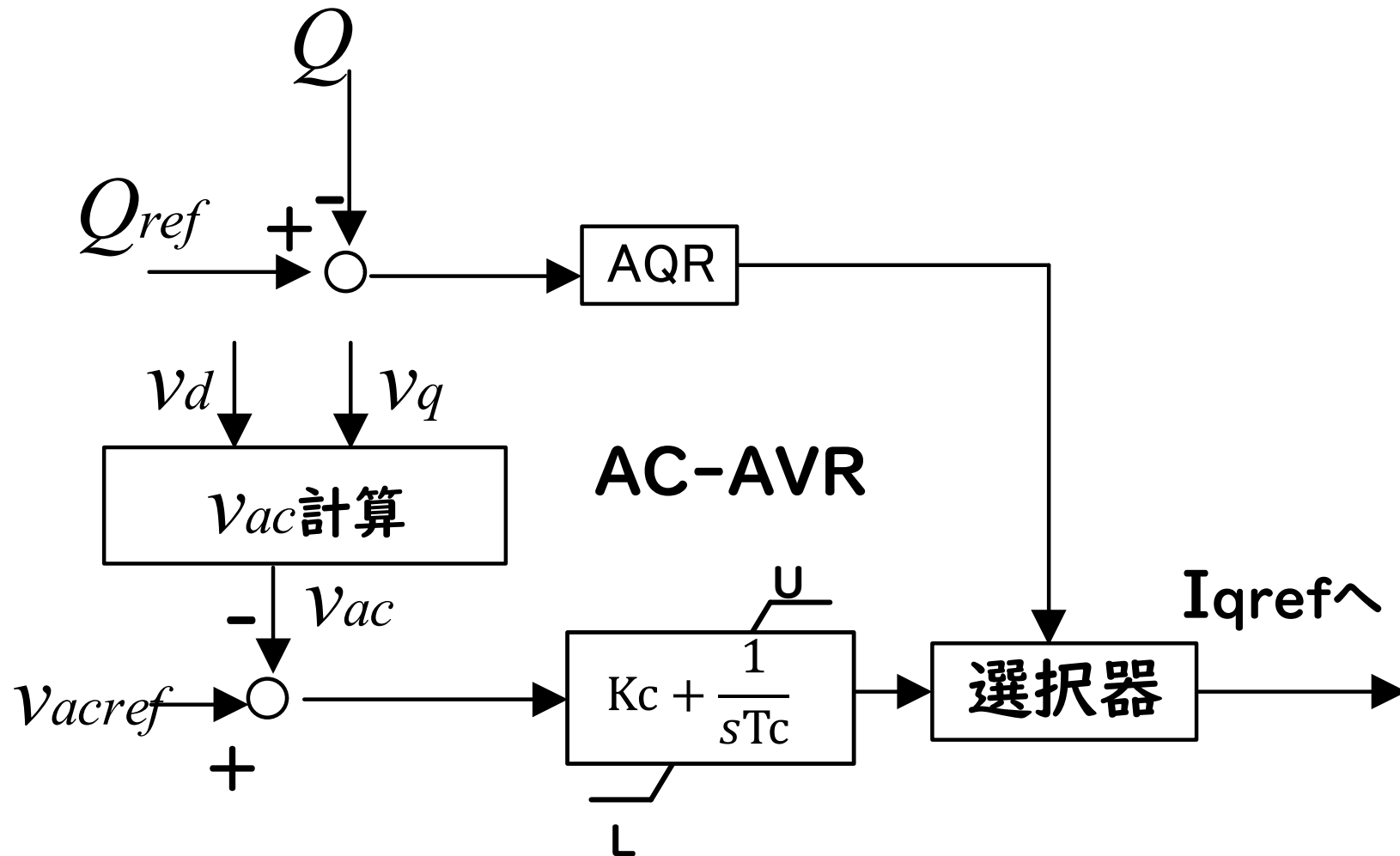


図 10 自励式 FC の制御特性図



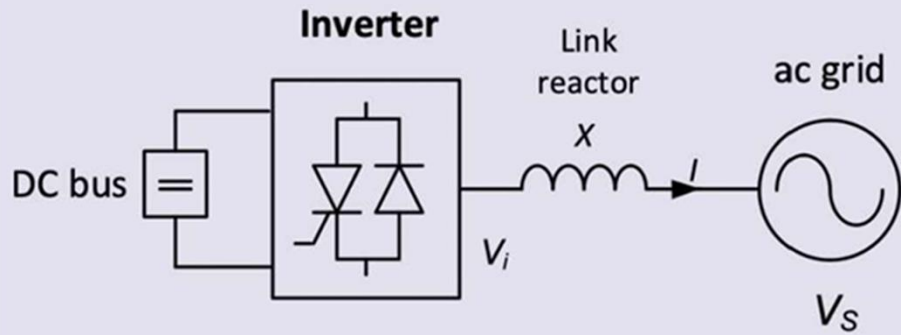
自励HVDCのAQRとAC-AVR (q軸)



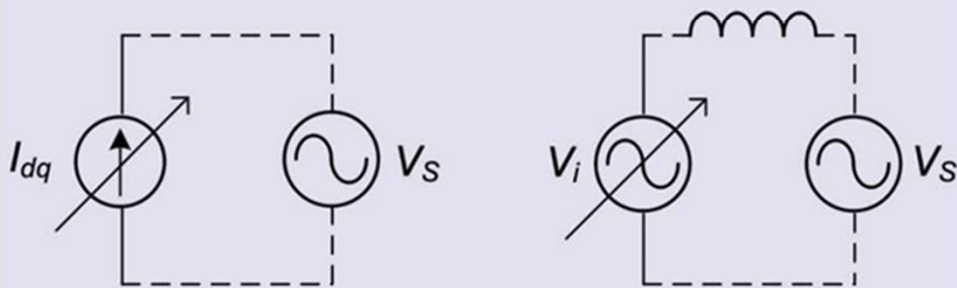
(3) GFMとGFL



GFMとGFL（本日の議論を踏まえて）



Inverter control options



Variable current

I_d, I_q

GFL

Variable voltage

V_i, f

GFM

GFM: 電圧形、 GFL: 電流形と言われている。

しかし、自励変換器の制御は見方によって電圧形とも電流形とも定義できる。

ACRで電流を決めているが、ゲート信号発生回路には、電圧指令信号が入力され、変換器は電圧源として扱われる。



GFMとGFLに関する検討課題

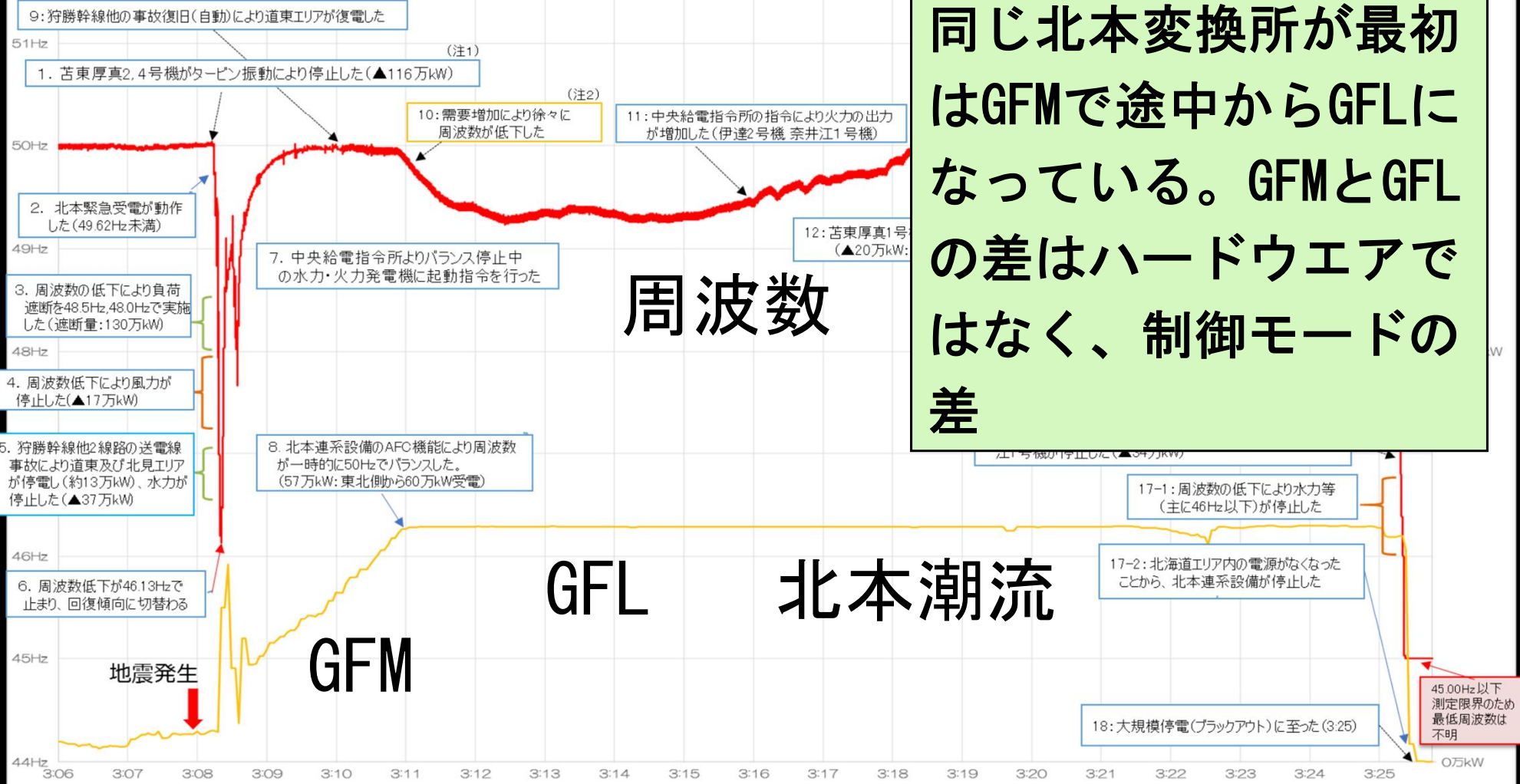
GFM:周波数自立、 GFL:周波数外部依存という分け方もある。しかし、周波数外部依存でも系統の周波数維持に貢献できるし、周波数が自立でも系統の周波数と無関係なら系統に同期して連系を続けることはできない。

GFMは系統周波数維持に貢献するという意味だと思うが、そのためには、エネルギーの供給が必要である。インバータ自体は変換機能だけである。エネルギー源まで考えないと議論できないようにも思われる。

電力系統の周波数安定化のために**自律的に**出力を制御できる電源（GFM電源）、それをしない電源をGFL電源として、実際の現象を検証してみる。



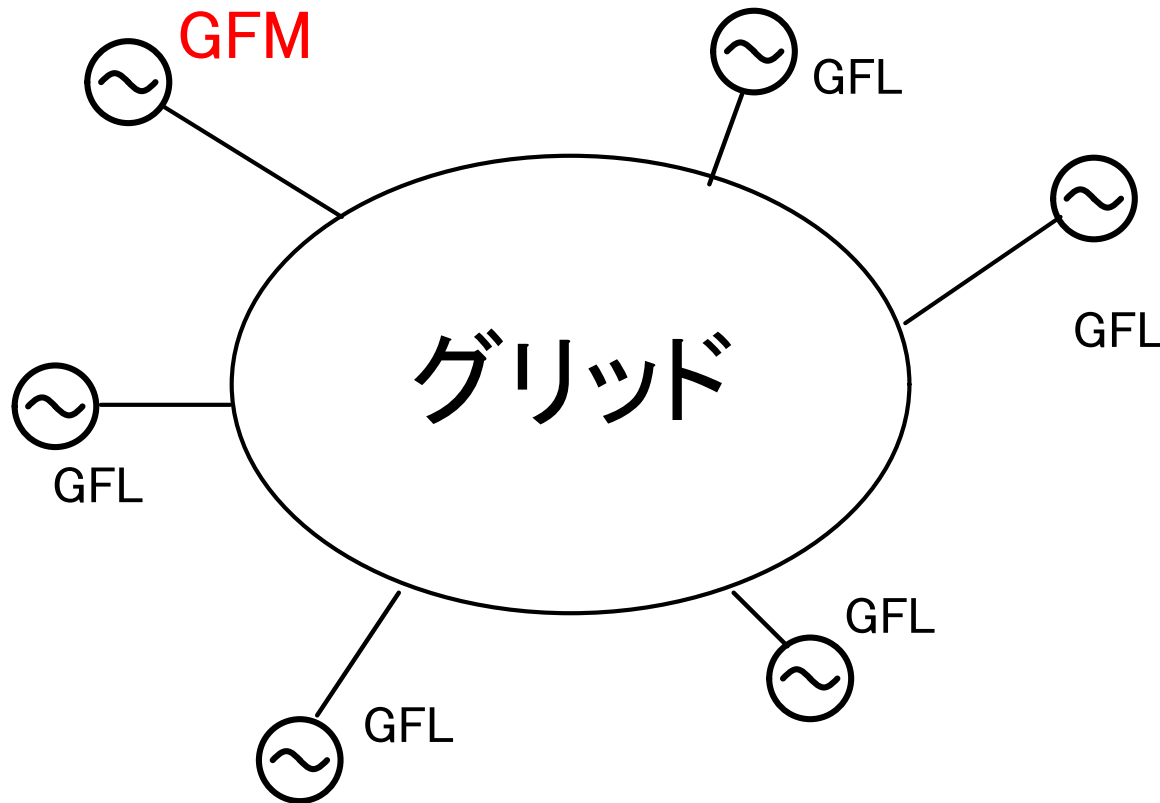
2018北海道ブラックアウト 直流送電の動き



同じ北本変換所が最初はGFMで途中からGFLになっている。GFMとGFLの差はハードウェアではなく、制御モードの差



GFMはひとつでもOK



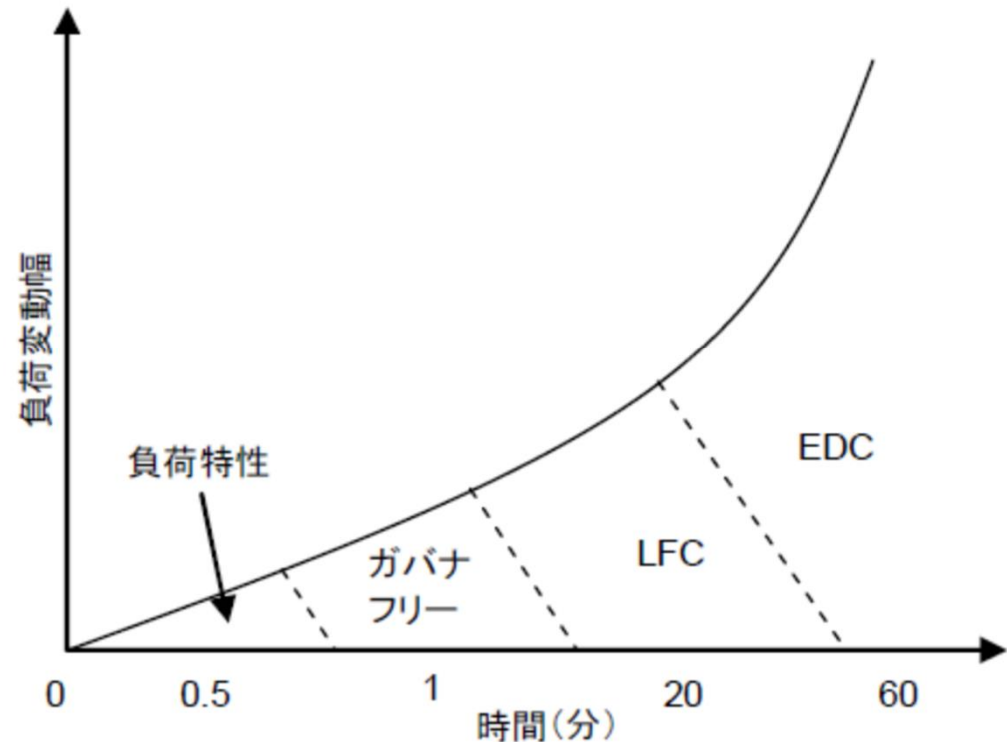
離島では、変換器がCVCF運転されGFMとなり、同期発電機による電源がGFLになることもある。

数分間の時間領域では、ガバナーフリー電源はGFMであり、ロードリミッタ運転はGFLである。GFM, GFLの検討は時間領域に絞って検討するとわかりやすい。



時間領域とIBR

電力システムの周波数安定化の時間領域とインバータ電源IBR (Inverter-based Resources) が効果的な領域
高速で応答できる周波数制御不足が問題であって慣性力の問題ではないかも知れない



IBRが効果的

ただし、パワーエレの制御理論は外部に正弦波電源があることを前提にした部分が多いので、電磁誘導に基づく同期機電源はある程度必要。二者択一ではない。



まとめ

・他励HVDC

同じ変換器で、バイアス量を変えるだけ役割を逆転できる。考え方は今後も参考になる。

・自励HVDC

PWMとdq変換がキー技術になっている。有効電力と無効電力など、2つの変数を独立に制御できる。

・GFMとGFL

まだまだ検討課題がある。インバータが周波数安定化の能力は高いので、うまく使うと系統品質は向上する。それには適切な制度設計が重要である。

