

XTAP 例題集		番 号	HVDC-03
例題名	自励式 HVDC モデル(ハーフブリッジ MMC)		
分 野	パワーエレクトロニクス		
文 献	<p>(1)町田武彦編著,「直流送電工学」,東京電機大学出版局</p> <p>(2) 菊間俊明, 竹中清, 高崎昌洋「フルブリッジセルを用いたモジュラーマルチレベル変換器による直流送電システムの制御保護方式 -直流事故時の事故電流を抑制可能な制御方式の提案-」, 電力中央研究所 研究報告 R11021, (2012).</p> <p>(3) 菊間俊明, 他, 「2 重 Y 結線モジュラーマルチレベル変換器の制御法」, 電気学会論文誌 D, Vol. 133, No. 9, pp. 917-927 (2013).</p>		
概 要	<p>本モデルは基本的な制御系, 及び保護系を備えているため, 本モデルをコピーし, 定格値を変更することで, その他のシミュレーションに応用することが可能である。</p> <p>本例題では Modular Multilevel Converter(MMC)を用いた直流送電システムの回路シミュレーションを行う。本例題は自励式 HVDC(HVDC-02)の例題と同等の構成であるが, 変換器回路が MMC 回路に置き換えられている。本例題では変換器の潮流反転, 直流本線地絡事故を行った場合のシミュレーション波形を示す。</p> <p>例題としていくつかの MMC モデルを作成している。</p>		

MMC に関する簡易解説

MMC に関して以下に簡易な解説を行う。詳細な解説に関しては、参考文献を参照のこと。同一セル（モジュール）を多段接続することにより構成する変換器を MMC (Modular Multilevel Converter) と呼ぶ。セルにはハーフブリッジセルを用いるものと、フルブリッジ（単相インバータ）セルを用いるものがある。本例題では、ハーフブリッジ MMC のモデルを扱う。MMC は、セルの段数が多くなると回路中の素子数が膨大となるため、計算コストが非常に大きくなるという問題がある。この問題に対し、スイッチング動作を平均化してモデル化した平均化モデルが用いられる場合もある。本例題では、

①ハーフブリッジ MMC 平均化モデル(HVDC-03A)

②ハーフブリッジ MMC 詳細モデル(HVDC-03B)

2 種類のモデルを扱う。

なお、詳細モデルと比較し平均化モデルの方が非常に高速なため、特に明確な理由がない場合は平均化モデルの使用を推奨する。MMC の制御に関しては、参考文献として示した文献で用いた制御の組み合わせ、応用した制御を用いている。

はじめに・モデルの使い方

MMC モデルを使用するのに必要な各パラメータは末尾の表を参照のこと。また、の有効電力出力を変更する場合、一番上位の部品階層から一つ下の階層にある” MASTER_VSC1”内の”Pdorder”を変更すること。

解析回路・解析条件

図 1 に解析回路を示す。

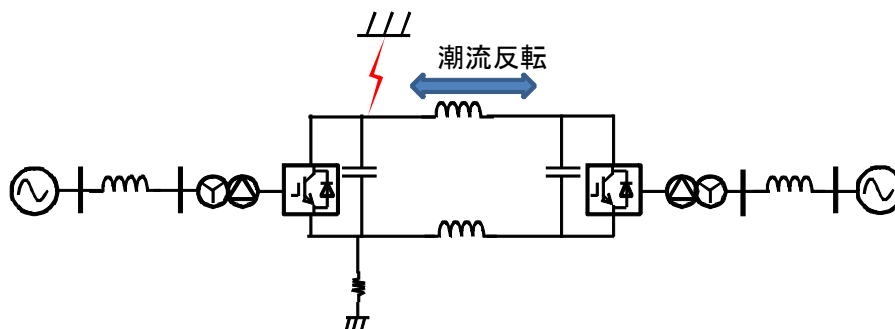


図 1 解析回路

・ 定格機器容量: 50 MW (55.9 MVA), 1 次側定格電圧: 66 kV, 2 次側定格電圧: 56 kV, 直流電圧: 125 kV である。

・ 直流送電システムは系統の短絡容量模擬のインピーダンスを介して系統(66 kV)と連系されている。

る。

・本シミュレーションでは①潮流反転，②直流本連地絡事故のシミュレーションを行う。シミュレーション時刻 $t = 0.5$ 秒で電力指令値を変更し潮流反転を開始する。 $t = 0.8$ 秒で地絡事故が発生し，その後遮断器により除去される。

解析結果

図 2，図 3 に潮流反転時の直流コンデンサ電圧，直流電流を示す。また，図 4，図 5 に潮流反転時の端子 1，端子 2 から出力される有効電力，無効電力を示す。本シミュレーションでは各端子の無効電力制御は交流側定電圧制御(ACA VR)を行っており，変換器の端子電圧が 1.0 p.u.に近づくように無効電力の制御を行う。

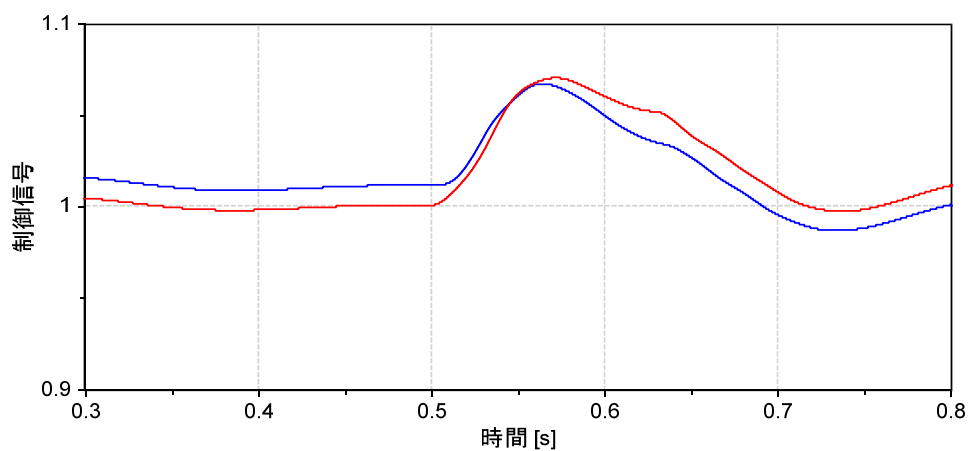


図 2 直流コンデンサ電圧 (全セル平均値) [p.u.] (基準電圧は 125 kV)

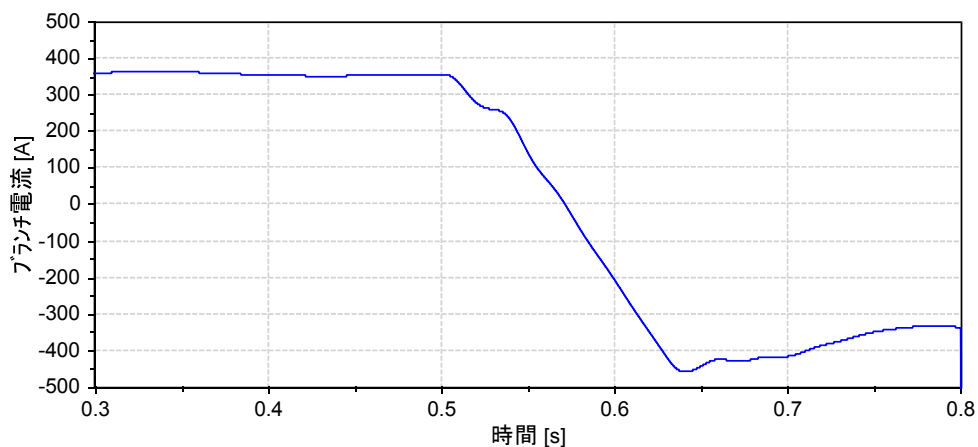


図 3 直流電流 [A]

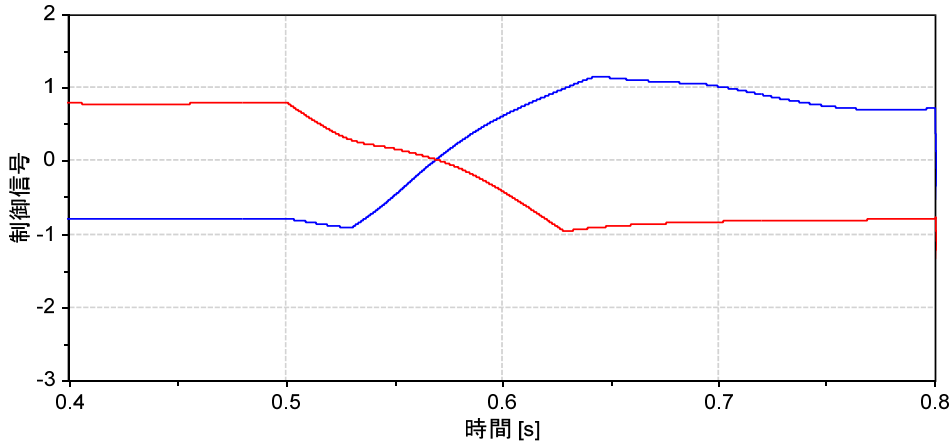


図4 有効電力 [p.u.] 青線：端子1, 赤線：端子2 (基準容量は 55.9 MVA)

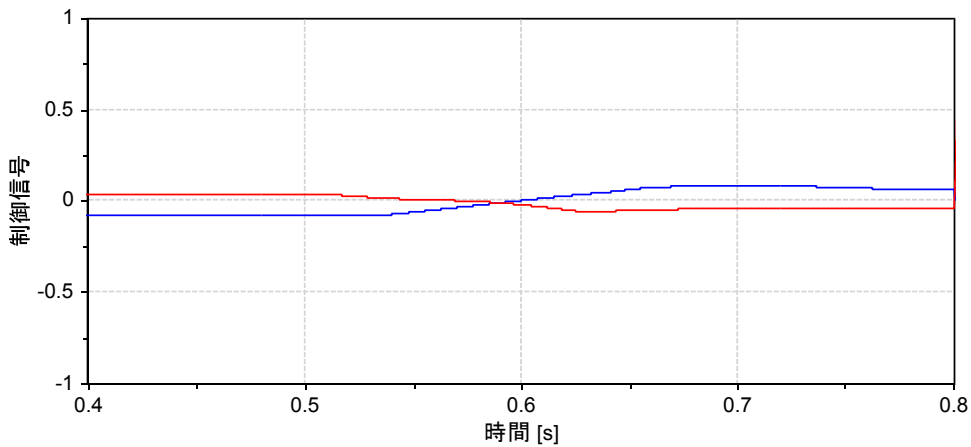


図5 無効電力 [p.u.] 青線：端子1, 赤線：端子2 (基準容量は 55.9 MVA)

$t=0.5$ 秒の時点で電力指令値が 45 MW(0.8 p.u.)から -45 MW(-0.8 p.u.)に切り替わり潮流反転が開始される。順変換器側(Rectifier)が有効電力制御を行い、もう一方の系統に送る電力を決定し、逆変換器側(Inverter)が直流電圧制御を行い、直流電圧を決定する。

また、図 6 に直流事故時の直流コンデンサ電圧、図 7 に直流事故時の系統側出力電流を示す。 $t = 0.8$ 秒で直流事故が発生する。システムが直流事故を検出後、変換器はゲートブロック (GB) →遮断器開放の操作を行うため、事故期間中は変換器から大きな電流が出力されるものの、遮断器開放後は系統側出力電流が 0 になる。

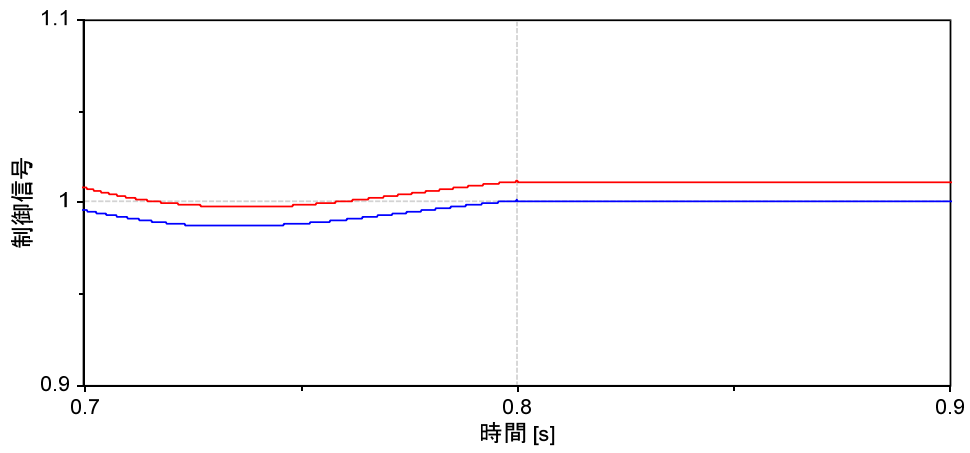


図6 直流コンデンサ電圧 [p.u.] 青線：端子1，赤線：端子2（基準電圧は125 kV）
 (値は6アームのコンデンサ電圧の平均値)

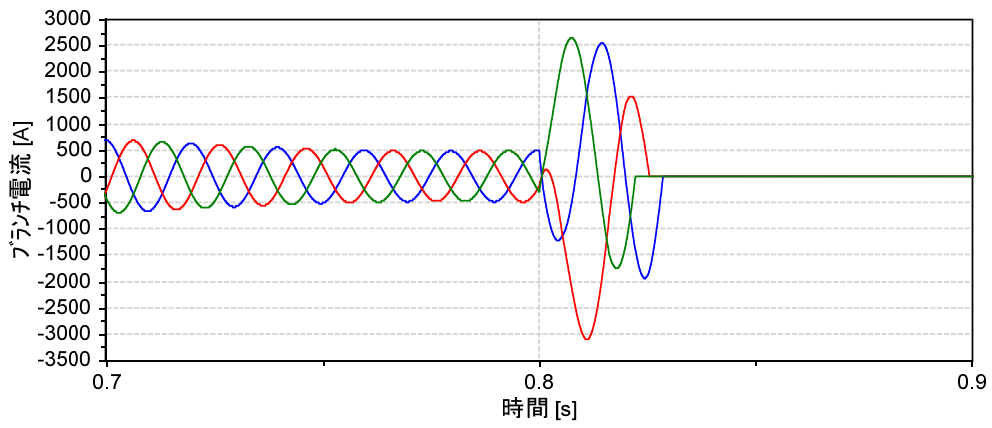


図7 系統側出力電流 [A]

モデルの各パラメータとその内容を示す。なお、端子 2 の設定については、端子 1 と変数名が同じで末尾の 1 が 2 に置き換わっただけであるので、ここでは割愛する。

	Name	Unit	Item
共通定数	Rate_P	W	定格有効電力
	Rate_Vdc	V	定格直流電圧
	SSRelayOffTime	s	シミュレーション開始時のリレー不動作時間
	FlagInitialize	-	初期化用フラグ (シミュレーションを定常状態から開始するために使用する) 定常状態から開始する場合は 1 を入力
	V_ThirdOrder	p.u.	変調率低減のための第 3 高調波注入量
	CellNumPerArm	-	MMC セルの 1 アーム当たりの段数(平均化モデルでは常に 1 を入力)
	SystemFrequency1	Hz	系統周波数
	Rate_S1	VA	定格容量
	Rate_V1_ltol1	V	変圧器 1 次側線間電圧実効値
	Rate_V2_ltol1	V	変圧器 2 次側線間電圧実効値
	PWMPulseNumber	-	PWM パルス数(一周あたり)
	R_TransGND1	Ω	変換器用変圧器の接地抵抗
	H1	s	静電定数
	Flag_ACAVR1	-	ACAVR フラグ(1:採用, 0:不採用), Flag_AQR との選択
	Flag_AQR1	-	AQR フラグ(1:採用, 0:不採用), Flag_ACAVR との選択
	Vac_order1	p.u.	交流電圧指令値(ACAVR 指令値)
	Q_order1	p.u.	無効電力指令値(AQR 指令値)
	PWMPhase1	deg	PWM 搬送波の位相角
	R_connect pu1	p.u.	変換器用変圧器の抵抗
	L_connect pu1	p.u.	変換器用変圧器のインダクタンス
	L_Arm pu1	p.u.	アームリアクトルインダクタンス
	L_DCK_pu1	p.u.	直流リアクトルのインダクタンス (上側線路用) インダクタンス値 = L_DCK_pu1 × 定格直流電圧 ² / 定格有効電力
	L_DCA pu1	p.u.	直流リアクトルのインダクタンス (下側線路用)
	Gain_ACR1	-	ACR ゲイン
	T_ACR1	s	ACR 時定数
	Gain_APR1	-	APR ゲイン
	T_APR1	s	APR 時定数
	Lag_APR1	s	APR 一次遅れ時定数
	Gain_DCAVR1	-	DCAVR ゲイン
	T_DCAVR1	s	DCAVR 時定数
	Gain_AQR1	-	AQR ゲイン
	T_AQR1	s	AQR 時定数
	Gain_ACAVR1	-	ACAVR ゲイン
	T_ACAVR1	s	ACAVR 時定数
	Vmag1	p.u.	電圧マージン
	Pmag1	p.u.	電力マージン
Lag_Margin1	s	マージン切り替え時の一次遅れ時定数 (切り替え速度)	

InvLimit1	p.u.	変換器最大電流（分母は変換器定格）
K_DCFRD1	-	直流事故検出リレーのゲイン（値が小さいほど敏感）
T_DCFRD1	s	直流事故検出リレーの一次遅れ時定数
Threshold_DCOC1	p.u.	直流過電流リレー閾値
Threshold_OC1	p.u.	過電流リレー閾値
Threshold_DCOV1	p.u.	直流過電圧リレー閾値
Threshold_DCUV1	p.u.	直流不足電圧リレー閾値
Threshold_OV1	p.u.	交流過電圧リレー閾値
Threshold_UV1	p.u.	交流不足電圧リレー閾値
Threshold_OF1	p.u.	周波数上昇リレー閾値
Threshold_UF1	p.u.	周波数低下リレー閾値
VAMP_LAG1	s	交流電圧検出の一次遅れ時定数
FREQ_LAG1	s	周波数検出の一次遅れ時定数
RecoveryTime1	-	故障リレー解除から実際の保護操作解除までの遅れ
GBTime1	s	GB 実施時間
NoDetectPeriod1	s	起動時の一部リレー不動作時間
CalculationTime1	s	制御周期
DeadTime1	s	デッドタイム
Flag_DirectSample1	-	電圧，電流量直接検出フラグ（3種の中から選択）
Flag_AverageSample1	-	電圧，電流量の移動平均による検出フラグ（3種の中から選択）
Flag_PeakTopSample1	-	電圧，電流量のピークトップ検出のフラグ（3種の中から選択）
ChargeCircuitCloseTime1	s	充電開始時刻（過渡状態からスタートなら負の大きい値を代入）
ChargeTime1	s	充電時間
Control_StartDelay1	s	充電終了から，制御系動作開始までの時間
ManualCL_Time1	s	電流絞り（電流ゼロ制御）を開始する時刻 （変換器保護を模擬する際に使用）
ManualGB_Time1	s	ゲートブロックを開始する時刻 （変換器保護を模擬する際に使用）
ManuaCBT_Time1	s	遮断器開放を開始する時刻 （変換器保護を模擬する際に使用）

以上

更 新 履 歴

日 付	例題ファイル バージョン	変 更 内 容
2019/12/3	1.2	部品名称（HVDC（MMC 変換器，ハーフブリッジ，平均化）→HVDC 用 MMC 変換器（ハーフブリッジ，平均化）と HVDC（MMC 変換器，ハーフブリッジ，詳細）→HVDC 用 MMC 変換器（ハーフブリッジ，詳細））を変更
2019/02/28	1.1	HVDC モデルの不要なブロックを削除したため，HVDC モデルを再接続
2018/06/21	1.0	初版作成