

大容量・高信頼性HVIGBT モジュール“Xシリーズ”

羽鳥憲司*
大田賢児*
田中宜彦*

HVIGBT Module "X Series" with High Power Rating and High Reliability

Kenji Hatori, Kenji Ota, Nobuhiko Tanaka

要 旨

大電力を高速にスイッチングする三菱電機のHVIGBT(High Voltage Insulated Gate Bipolar Transistor)モジュールは、1997年に製品化して以来、高い信頼性が評価され、主に電鉄の駆動用システムや工業用大型機器などの電力変換装置に広く採用されてきた。近年は電鉄市場の世界的拡大や、HVDC(High Voltage DC transmission)などの応用分野への適用事例の増加を受け、HVIGBTの需要が高まっている。当社では、3.3kV以上の耐圧クラスに特化した製品として、2008年に“Rシリーズ”HVIGBTを市場投入した。RシリーズHVIGBTでは電流容量の増加や動作温度の拡大を実現し、電鉄・電力市場の発展に大きく貢献してきた。

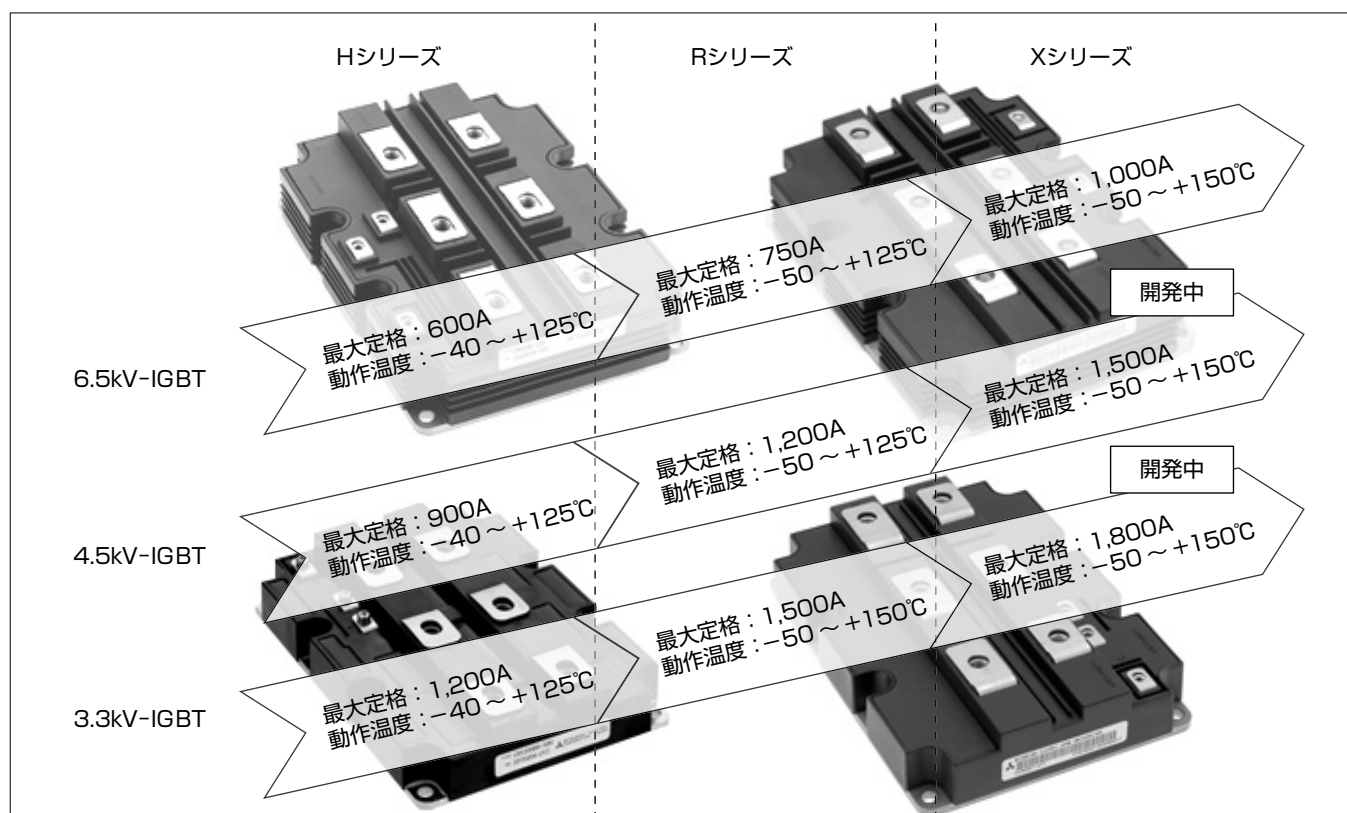
そのRシリーズHVIGBTの後継機種として、2015年11月に“Xシリーズ”HVIGBTの発売を開始した。XシリーズHVIGBT

では“CSTBT(Carrier Stored Trench-gate Bipolar Transistor)”構造を6.5kV-IGBTに採用し、業界最大^(注1)容量である6.5kV/1,000A定格を実現した⁽¹⁾。XシリーズHVIGBTの特長は次のとおりである。

- (1) 大容量(6.5kV/1,000A, 4.5kV/1,500A, 3.3kV/1,800A)
- (2) 全耐圧クラスで動作保証温度150℃
- (3) 優れた耐環境性能
- (4) 従来製品との外形互換性を確保

今後は6.5kV製品に引き続き、3.3kV製品や4.5kV製品についても順次市場投入し、電鉄・電力市場の更なる発展に貢献していく。

(注1) 2015年9月29日現在、当社調べ



当社製HVIGBT(耐圧クラス3.3kV以上)の製品変遷

当社の3.3kV以上の耐圧クラスのHVIGBTについて、シリーズごとの最大定格電流と動作温度の変遷を示す。Xシリーズでは“Hシリーズ”の1.5倍以上の定格電流を予定している。また、動作温度についても、Hシリーズでは最大125℃であったが、Rシリーズで3.3kV-IGBTが最大150℃に対応し、Xシリーズでは全耐圧クラスで最大150℃対応を予定している。

1. ま え が き

電鉄の駆動用システムや工業用大型機器などの電力変換装置用途に、大容量・高信頼性パワー半導体である当社のHVIGBTが多く搭載されてきた。従来、当社の3.3kV以上の耐圧クラスのHVIGBTにはプレーナ構造のIGBTチップを採用してきたが、今回、当社独自のトレンチ構造であるCSTBTを初めて6.5kV-IGBTに適用したXシリーズHVIGBTの開発に成功した。また、RFC(Relaxed Field of Cathode)ダイオードを新たに搭載し、CSTBT構造のIGBTとの相乗効果で6.5kV/1,000Aの大容量素子を実現した。

本稿では、6.5kV/1,000A素子を中心にXシリーズHVIGBTの特長と性能について述べる。

2. XシリーズHVIGBTの構造と特長

2.1 XシリーズのCSTBTチップ

XシリーズHVIGBTモジュールに採用したIGBTチップは次の特長を備える(図1)。

(1) コレクタ-エミッタ間飽和電圧(V_{CEsat})の低減

当社独自技術であるCSTBT構造の適用によって、IGBT表面のキャリア密度を高めることができる。それによって、IGBTチップの厚み方向のキャリア分布を高く保つ効果が得られる。その結果、3章で述べるように V_{CEsat} の劇的な低減を実現できた。

(2) 破壊耐量の向上

裏面のpコレクタ層をパターンニングする部分pコレクタ構造を採用した。それによって、IGBTチップ外周部のキャリアの流入を抑制し、ターンオフ破壊耐量や短絡耐量を大幅に改善することができた。

(3) 熱抵抗の低減

新たなチップ終端構造として、LNFLR(Linearly-Narrowed Field Limiting Ring)構造⁽²⁾を採用した。この構造は耐環

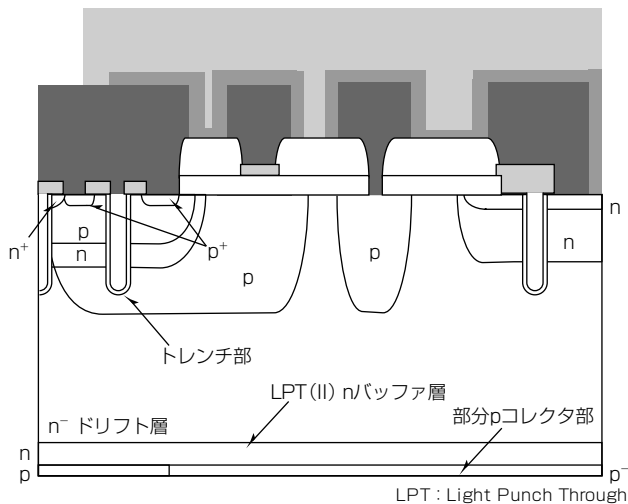


図1. XシリーズIGBTチップの断面図

境性能に優れているため、従来の終端構造に比べて終端長を大幅に低減できる。特に6.5kV-IGBTではこの構造を採用することで、チップの有効面積を28%拡大でき、次に述べるように、熱抵抗の大幅な低減を実現した(図2)。

2.2 XシリーズRFCダイオードチップ

XシリーズHVIGBTモジュールに採用したダイオードチップは次の特長を備える(図3)。

(1) V_F の低減と破壊耐量の向上

裏面にP層を形成するRFCダイオード構造⁽³⁾の適用によって、ダイオード裏面の電界を緩和することができる。それによって、ダイオードのリカバリー耐量を大幅に改善し、 V_F を劇的に低減することができた。

(2) 熱抵抗の低減

IGBTと同様にダイオードにも耐環境性能に優れた終端構造であるLNFLR構造を採用した。それによって、6.5kVダイオードでは有効面積を50%も拡大でき、熱抵抗を大幅に低減することに成功した(図4)。



図2. IGBTチップの有効面積拡大

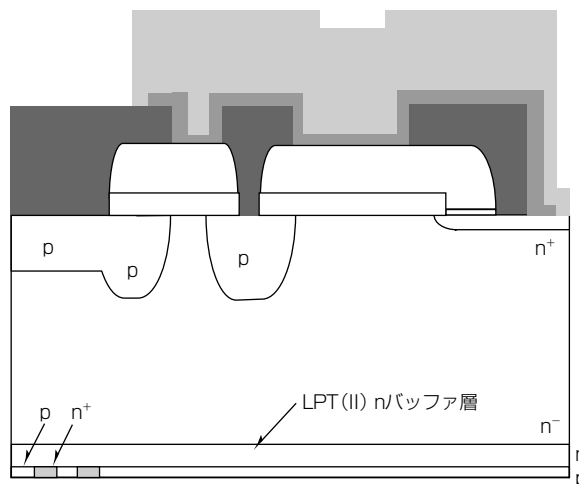


図3. Xシリーズダイオードチップの断面図

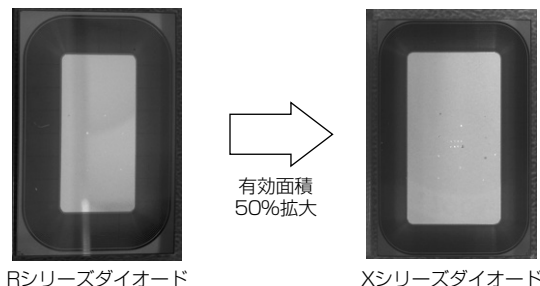


図4. ダイオードチップの有効面積拡大

2.3 Xシリーズのパッケージ

封止剤に耐環境性能に優れたシリコンゲルを採用した。それによって、高湿度環境などの非常に厳しい環境に対しても優れた耐性を示す製品を実現できた。

2.4 Xシリーズの製品ラインアップ

当社は2015年11月に6.5kV/1,000A素子である“CM1000HG-130XA”の発売を開始した。他の耐圧クラスについても、順次市場投入を予定している。

3. XシリーズHVIGBTの性能

3.1 CM1000HG-130XAの静特性

Xシリーズ6.5kV/1,000A素子であるCM1000HG-130XAで、RシリーズHVIGBT“CM750HG-130R”比で V_{CEsat} を38%低減、エミッター-コレクタ間電圧(V_{EC})を25%低減した。CM1000HG-130XAのIGBT部の出力特性を図5に、静特性スペックを表1に示す。

3.2 CM1000HG-130XAの熱抵抗

LNFLR終端構造の適用によって、RシリーズHVIGBT(CM750HG-130R)比で、IGBT部の熱抵抗($R_{th(j-c)Q}$)が8.3%減、ダイオード部の熱抵抗($R_{th(j-c)D}$)が22.7%減となった(表2)。

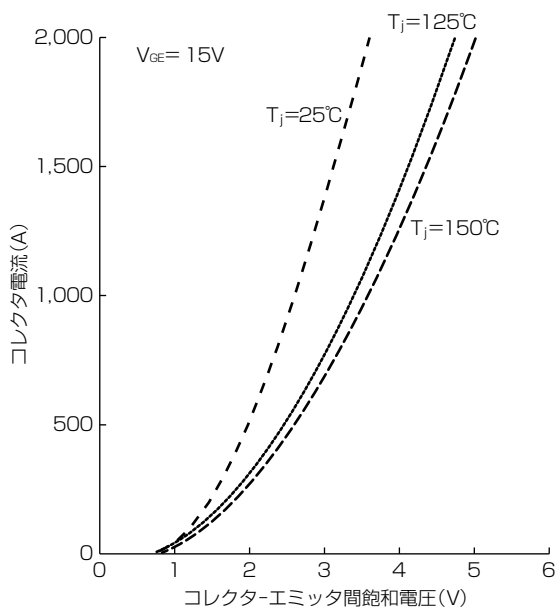


図5. CM1000HG-130XAのIGBT部の出力特性

表1. 静特性スペック

品種	V_{CEsat} (1,000A, 125°C)	V_{EC} (1,000A, 125°C)
CM750HG-130R	5.5 V	4.0 V
CM1000HG-130XA	3.4 V	3.0 V

表2. 熱抵抗スペック

品種	$R_{th(j-c)Q}$	$R_{th(j-c)D}$
CM750HG-130R	12.0K/kW	22.0K/kW
CM1000HG-130XA	11.0K/kW	17.0K/kW

3.3 CM1000HG-130XAの破壊耐量

XシリーズHVIGBTでは部分pコレクタ構造の適用によって、非常に強固なターンオフ耐量を確保した。CM1000HG-130XAでは定格1,000Aに対し、4.4倍の4,400Aでも非破壊と、動作温度150°Cの条件下でも十分な耐量があることを確認した(図6)。

また、ダイオードの破壊耐量についても、RFCダイオード構造の適用によって、動作温度150°Cの条件下で、リカバリー動作時のピークパワー(P_{rr})が12.8MWで非破壊と、十分な破壊耐量を持つことを確認した(図7)。

3.4 CM1000HG-130XAの短絡耐量

インバータ回路における短絡動作モードには、IGBTとダイオードがともに非導通状態から短絡を開始するモード(短絡Type1)のほか、IGBTがターンオンしている際の短絡動作(短絡Type2)や、ダイオードが還流中の逆並列IGBTの短絡動作(短絡Type3)がある。XシリーズHVIGBTでは、短絡Type1だけでなく、より厳しい短絡モードである短絡Type2や短絡Type3についても、十分な耐量を確保することに成功した。

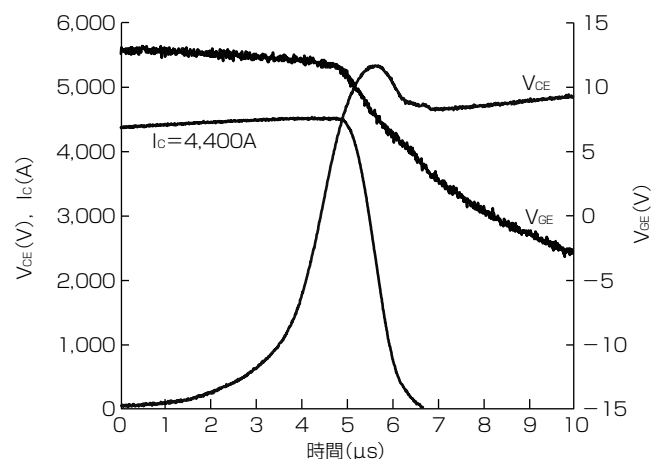


図6. CM1000HG-130XAのターンオフ耐量波形

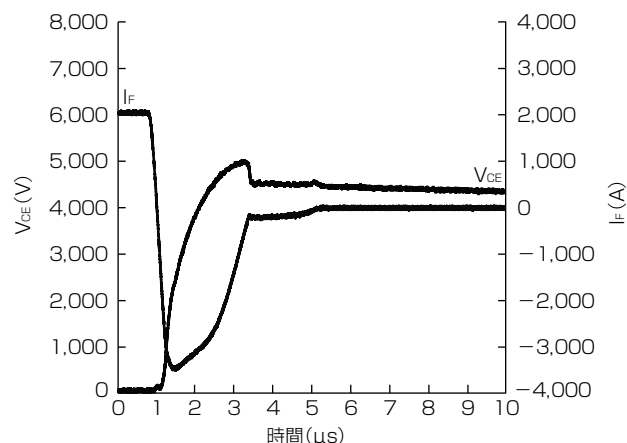
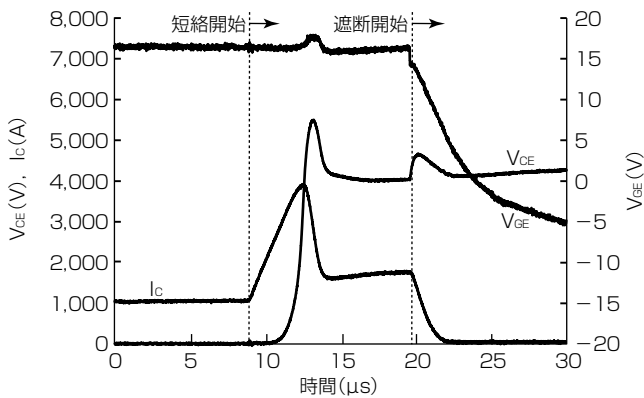
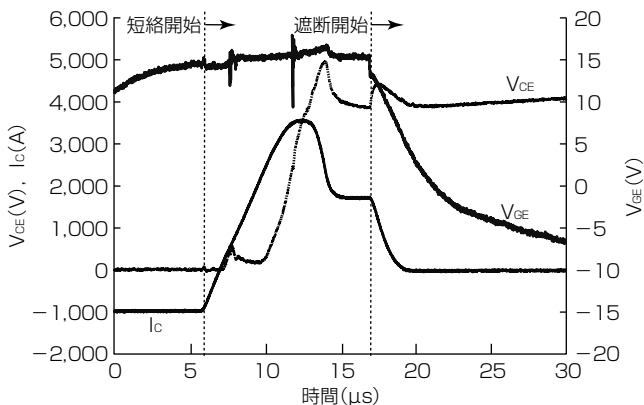


図7. CM1000HG-130XAのリカバリー耐量波形



試験条件： $T_j=150^{\circ}\text{C}$ ， $V_{cc}=4,200\text{V}$ ， $I_c=1,000\text{A}$ ， $L_s=4.2\mu\text{H}$

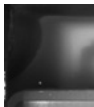
図8. CM1000HG-130XA(1/3駆動)の短絡Type2波形



試験条件： $T_j=150^{\circ}\text{C}$ ， $V_{cc}=4,200\text{V}$ ， $I_c=-1,000\text{A}$ ， $L_s=4.2\mu\text{H}$

図9. CM1000HG-130XA(1/3駆動)の短絡Type3波形

表3. 結露試験1サイクル

ステップ	条件	ゲル状態
ステップ1	85℃，85%，36時間保持	 無色透明
ステップ2	冷却	
ステップ3	25℃，50%，2時間保持	 白濁(結露)
ステップ4	DC5,200V印加試験 25℃，50%，3分	

CM1000HG-130XAの短絡Type2波形を図8に，短絡Type3波形を図9に示す。素子のコレクタ主端子及びエミッタ主端子のそれぞれ3端子のうち1端子のみを接続することで，モジュール全体の1/3のみを動作させて試験実施している。よって，試験電流波形の3倍がモジュール全体の電流波形と等価となる。

試験では，モジュールの1/3部分に1,000Aと定格の3倍を通電した状態から短絡状態へ移行させ，10μsの短絡期間を経た後に，問題なく遮断可能であることを確認した。

3.5 CM1000HG-130XAの耐環境性能

当社は，高湿度環境に対する耐性を調査する試験として，表3に示す結露試験方法を確立した⁽⁴⁾。ステップ1～4まで

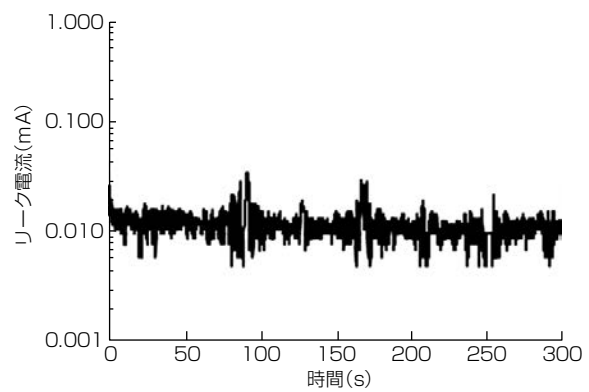


図10. 結露試験5サイクル後のステップ4試験波形

を実施することでモジュール内を結露させ，これを繰り返し実施することで高湿度環境に対する耐性を確認しており，XシリーズHVIGBTでも，この結露試験によって高湿度環境に対する耐性を調査した。

XシリーズHVIGBTでは耐環境性能に優れたチップ終端構造LNFLR構造や，耐環境性シリコンゲルを採用している。その結果，結露試験を5サイクル実施しても，ステップ4におけるリーク電流の増加はみられず，高湿度環境に対して強い耐性を持つことを確認した(図10)。

4. む す び

電鉄・電力用途のHVIGBTには高い信頼性が求められることから，当社ではロバスト性を重視した設計を行ってきた。新たに開発したXシリーズHVIGBTでも，従来に比べて大きく損失を低減しながら，高破壊耐量及び優れた耐環境性能を示すロバスト設計を実現した。

当社では，こうした非常に高い信頼性を持つ大容量のXシリーズHVIGBTのラインアップを今後拡充していき，電鉄・電力市場の発展に引き続き貢献していく。

参 考 文 献

- (1) Ota, K., et al.: The Next Generation 6.5 kV IGBT Module with High Robustness, PCIM Europe 2014, 28～33 (2014)
- (2) Chen, Z., et al.: A Balanced High Voltage IGBT Design with Ultra Dynamic Ruggedness and Area-efficient Edge Termination, Proc. ISPSD 2013, 37 (2013)
- (3) Nishii, A., et al.: Relaxation of Current Filament due to RFC Technology and Ballast Resistor for Robust FWD Operation, Proc. ISPSD 2011, 96 (2011)
- (4) Tanaka, N., et al.: Robust HVIGBT module design against high humidity, PCIM Europe 2015, 368～373 (2015)