

赤木 泰文「三相電力の定式化の確立と半導体電力変換システムの先駆的研究」

AKAGI, Hirofumi: “Establishment of Mathematical Formulation of Three-Phase Power Components, and Pioneering Research on Semiconductor-Based Power Conversion Systems”

1. 経歴と受賞・顕彰

1951 年 8 月 岡山市生まれ
1974 年 名古屋工業大学 工学部電気工学科卒業
1979 年 東京工業大学 大学院電気工学専攻博士課程修了 (工学博士)
1979 年 長岡技術科学大学 工学部電気系助手. その後に講師, 助教授
1987 年 米国 マサチューセッツ工科大学(MIT) 客員研究員 (10 ヶ月)
1991 年 岡山大学 工学電気電子工学科 教授
1996 年 米国 ウィスコンシン大学マディソン校 客員教授 (3 か月)
引き続き MIT 客員教授 (3 か月)
2000 年 東京工業大学 工学部電気・電子工学科 教授
2017 年 同大学 名誉教授。工学院 特任教授
2019 年 同大学 イノベーション人材養成機構 (IIDP) 特任教授
2022 年 同大学 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所 特任教授, 現在に至る。



赤木 泰文 (Akagi, Hirofumi)

●電気学会 論文誌論文賞 (1984, 1991, 1997, 2005, 2007). ●IEEE Transactions Prize Paper Awards (1991, 1999, 2003, 2004, 2009, 2013). ●IEEE Fellow (1996). ●IEEE Power Electronics Society William E. Newell Award (2001). ●IEEE Industry Applications Society Outstanding Achievement Award (2004). ●IEEE Richard Harold Kaufmann Award (2008). ●文部科学大臣表彰 科学技術賞 (研究部門) (2008). ●IEEE Power & Energy Society Nari Hingorani Custom Power Award (2012). ●電気学会産業応用部門 学術賞・宮入庄太賞 (2012). ●電気学会フェロー (2013). ●IEEE Medal in Power Engineering (2018). ●電気学会 電気技術顕彰 でんきの礎 (顕彰名称: 大容量 3 レベル中性点クランプインバータ) (2020). ●EPE (European Power Electronics and Drives Association) Gaston Maggetto Medal (2020). ●公益財団法人ヒロセ財団 第 1 回ヒロセ賞 (2021). ●電気学会 電気技術顕彰 でんきの礎 (顕彰名称: 三相回路の瞬時無効電力理論とその波及) (2022).

2. 半導体電力変換 (パワーエレクトロニクス) と研究概要

トランジスタなどの半導体デバイスは信号処理用と電力変換用に大別できる。前者は大規模集積回路 (LSI) へ発展し, 電子機器などに広く使用されている。後者については, 電気学会では「パワー半導体デバイス」という用語の使用を推奨しているが, 「パワーデバイス」という略称を使用すること多い。パワー(半導体)デバイスは, 通信・情報, 家電, 一般産業, 交通・運輸, 電力などの社会生活・インフラを支える製品・機器に使用されている。出力電力は数 W~10 GW ($G = 10^9$), 周波数は 0 (直流)~13.56 MHz ($M = 10^6$) に及んでいる。多くの製品・機器において電力と周波数の重要度は同等であり, 一般に電力と周波数を併記する。

半導体電力変換とパワーエレクトロニクスは同義語として使用されることが多い。その研究は「パワー半導体の材料・デバイス」と「パワー(半導体)デバイスを使用した電力変換システム」に分類できる。研究者・技術者の日本での主な学会活動の場は, 前者は応用物理学会, 後者の中大容量システムは電気学会, 通信・情報機器など小容量シス

テムは電子通信情報学会という棲み分けが確立している。

赤木の研究は中大容量電力変換システムを対象としている。実験に使用したパワー半導体デバイスは、シリコン (Silicon) のダイオード、サイリスタ、パワートランジスタ、静電誘導トランジスタ (SIT: Static Induction Transistor), MOSFET, IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor) である。最近では、炭化ケイ素 (SiC: Silicon Carbide) の MOSFET と SBD (Schottky Barrier Diode) の応用研究に注力している。研究成果は IEEE (米国電気電子学会) 論文誌や電気学会論文誌、国際会議などで発表している。IEEE 論文誌に発表した 148 編の論文の 6 編が論文誌論文賞を受賞した。Google Scholar によると、被引用件数の総数は 61,000, h-index は 102 に達している。2018 年に IEEE Medal in Power Engineering を、2020 年には EPE (欧州パワーエレクトロニクス学会) Gaston Maggetto Medal を受賞した。IEEE と EPE から最高位のメダルをダブル受賞した研究者は過去になく、赤木が世界初である。

代表的な研究業績は 1983 年 3 月に発表した「三相回路の瞬時電力理論 (pq 理論)」であり、約 40 年が経過した。パワーエレクトロニクスの専門家は pq 理論を「新概念の提案と新理論の確立」と評価し、電気学会や IEEE などの学術賞・顕彰につながった。故宮入庄太東工大名誉教授の「技術的な独創性は周辺技術の進歩に伴い、いずれは淘汰される運命にあるが、科学的な独創性は消えることはない。」は記憶に残る名言である[1]。 pq 理論が宮入先生の「科学的な独創性」の範疇に入るか否かは 60 年後 (理論の発表から 100 年後) の専門家の判断に委ねたい。

3. 半導体電力変換との出会い

岡山市で生まれ育ち、県立岡山大安寺高校から名古屋工業大学工学部電気工学科に進学した。大学では電力・エネルギーに関連した科目に関心を示し、最も興味を持った専門科目は高校時代には知り得なかった半導体電力変換であった。当時の初代新幹線電車 (0 系) や在来線通勤電車などの大電力の変換・制御を実現する新技術に出会い、1973 年の学士 (卒業) 研究から現在まで一貫して半導体電力変換システムの研究を継続している。

4. 三相回路の瞬時電力理論 (pq 理論)

4.1 背景と課題

高校物理に続いて大学理工学部の初年度に「有効電力」と「無効電力」を学習する。交流回路に抵抗とインダクタ (リアクトルとも呼ぶ) やキャパシタ (コンデンサとも呼ぶ) を接続すると、電圧と電流に位相差が発生し、電源と負荷との間を往復するだけで仕事をしない電力が発生する。これが無効電力である。位相差が大きくなると無効電力も大きくなる。位相差が 90° になるとすべてが無効電力となり、実際に仕事をする有効電力は零になる。高校物理など学習する有効電力と無効電力の定式化には電圧・電流波形が正弦波かつ定常状態という仮定を必要としている。

1970 年代からの半導体電力変換技術の発展に伴って、世界のパワーエレクトロニクス研究者は瞬時電力理論の必要性を認識し、その定式化に挑戦したが、専門家を納得させる理論までは到達しなかった。具体的には、単相回路の電圧は正弦波、電流をひずみ波 (非正弦波かつ周期波形) と想定し、瞬时无効電力を定式化した。しかし、現在時刻の電圧値と電流値だけでなく過去の電圧値と電

流値を使用として平均値演算などを行うため、厳密な意味での「瞬時」ではない。しかも、その平均値演算の時間幅を電源の一周期あるいは半周期とするか、はたまた特定のより短い時間幅に設定するか、によって瞬时无効電力の数値

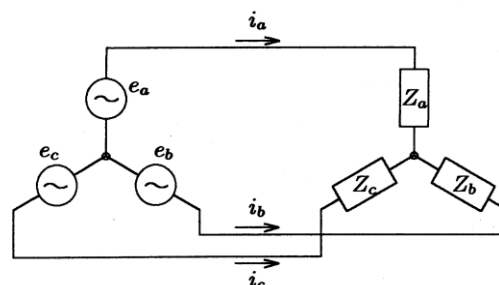


図1 三相三線交流回路

$$\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

式(1) 三相電圧・電流の瞬時値の $\alpha\beta$ 変換

が異なり、電気工学の基礎理論としては受け入れ難い難題に直面していた[2]。赤木は逆転の発想で、三相回路から理論を展開し、1983年3月に新理論を発表した。これが三相回路の瞬時電力理論（ pq 理論）である。

4.2 pq 理論の確立と三相回路の瞬时无効電力の実体解明

図1の三相三線交流回路では各相の瞬時電流の和は常に零となる（ $i_a + i_b + i_c = 0$ ）ので、電流の独立変数は2個となる。そこで、式(1)の $\alpha\beta$ 変換を施し、瞬時実電力 p と瞬時虚電力 q を式(2)で定式化した。

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ -e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$$

式(2) p と q の定式化

e_α と e_β に関する行列の行列式は $e_\alpha^2 + e_\beta^2 (> 0)$ であり、式(2)の逆変換

が可能である。そこで、瞬時実電力 p と瞬時虚電力 q から各相の瞬时有効電力と瞬时无効電力を定式化し、

1) α 相瞬时有効電力と β 相瞬时有効電力の和は、常に三相回路の瞬時実電力 p に等しい。

2) α 相瞬时无効電力と β 相瞬时无効電力の和は、常に零になる。

が常に成立することを数式証明し、世界で初めて瞬时无効電力の実体を解明（物理的意味を説明）した[3]。この実体解明は、専門家がなんとなく抱いていたイメージと合致していたので、すんなりと受け入れられた。この数式証明には現在時刻の電圧値と電流値しか使用していないので、電圧・電流波形に制限がなく、過渡時や非周期波形にも適用できる。理論を確立すると直ちに実験装置の設計・製作に着手し、1年後には理論の妥当性・有効性を実証した[4]。現在では、この瞬時電力理論は「 pq 理論」とも呼ばれている。この略称は式(2)の p と q の定式化に由来している。

2007年には、 pq 理論の誕生前までの電力理論、 pq 理論の誕生経緯、誕生後の波及と応用などを詳述した専門書の初版を、2017年には二版を上梓した[5]。この専門書は赤木とブラジル・リオデジャネイロ国立大学の研究者(2名)との共著である。文献[3]～[5]の被引用件数の総数は9,700 (Google Scholar) に達している。

4.3 pq 理論の学術・教育への貢献

ベルギーのアントワープ大学 (University of Antwerp) の Prof. Jacques L. Willems が1992年にIEEE論文誌に発表した論文[6]では、その論文題目に赤木と難波江の名を冠した“the Akagi-Nabae Power Components”という用語を使用し、 pq 理論を多相（四相以上）交流回路に展開した。 pq 理論の応用の進展と上記の専門書[5]の出版とが相まって、国内外の一部の大学では、電力工学・半導体電力変換工学などを専攻する大学院学生に pq 理論を講義している。

5. 三相3レベル中性点クランプ（NPC）インバータ

5.1 背景と技術課題

1970年代前半からの半導体製造技術の発展に伴い、パワー半導体デバイスを高速スイッチとして使用した電力変換（パワーエレクトロニクス）とその応用に関する研究開発が急速に進展した。1970年代後半には500V耐圧のパワートランジスタの実用化が始まった。日本企業は世界に先駆けて、この当時最新のパワートランジスタを6個使用した三相2レベルインバータを製品化した。その結果、三相200V誘導電動機の変速運転は実現できたが、三相400V誘導電動機を駆動するにはパワートランジスタの耐圧が不足していた。

そこで、500V耐圧のパワートランジスタとそれと逆並列接続した帰還ダイオードを1組とし、これら2組を直列接続して各アームを構成すると、三相400V誘導電動機を駆動できる。この発想はパワーエレクトロニクス研究者・技術者であれば容易に気が付くことであるが、半導体製品には製造に起因する個体差（特性バラツキ）が存在し、製品化において「直列接続した2個のパワートランジスタの同時オン・オフを、いかに実現するか」という新たな技術課題が生じた。

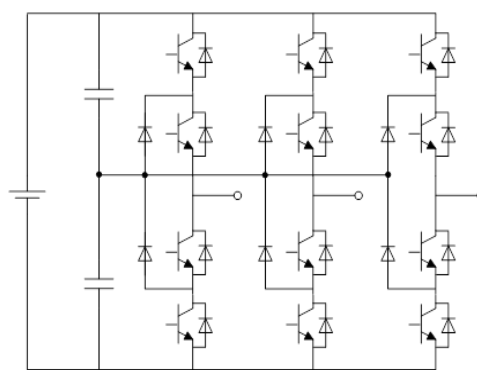


図2 三相3レベルNPCインバータ

5.2 三相3レベル NPC インバータとその世界初の動作実証

図2は1981年9月にIEEE論文誌に発表した三相3レベル中性点クランプ (NPC: Neutral-Point-Clamped) インバータの主回路構成である[10]。これは上記の技術課題を一挙に解決し、以下の特長も有する。

- 1) 各アームの直列接続したパワー半導体デバイスの同時オン・オフが不要。
- 2) インバータ交流端子での相電圧は3レベル波形（線間電圧は図3の5レベル波形）となり、誘導電動機のトルク脈動や鉄損を低減。
- 3) 図2に使用するパワー半導体デバイスはすべて同一電圧定格。

図3は長岡技術科学大学で設計・製作した3レベル NPC インバータを用いて三相誘導電動機 (200V, 2.2kW, 50Hz) を可変速運転した世界初の実験波形(定格運転時) [10]であり、1979年11月下旬に取得した。

図4は低圧用途に特化した三相3レベル NPC インバータの主回路構成である[10]。これは図2から派生したもので、図2と図4の基本回路動作は同一であるが、インバータ交流端子での電圧波形は完全には一致しない。文献[10]の被引用件数は6,500 (Google Scholar) に達している。

5.3 三相3レベル NPC インバータの実用化例

図2の NPC インバータの実用化は1981年のIEEE論文[10]の発表から12年を要した。これは当該分野では異例の速さである。これに対して図4の NPC インバータの実用化はIEEE論文の発表から26年以上を要した。

1) 鉄鋼圧延機プラントへの応用 1990年前後に、国内企業は世界に先駆けて4.5kV, 4kA GTO (Gate-Turn-Off Thyristor) の開発・製品化に成功した。1993年に、図2の三相3レベル NPC インバータを採用した圧延主機駆動の初号機 (4MVA) を鉄鋼プラントに納入した。さらに、世界最大容量の6kV, 6kA GTOを使用した10MVA (過負荷15MVA) の NPC インバータを開発し、1995年頃から大規模鉄鋼圧延システムに納入を開始した。現在では、欧米企業なども図2の NPC インバータを鉄鋼圧延システムや一般産業の高圧交流電動機駆動などに採用している[11]。

2) 新幹線電車への応用 1990年代後半になると、ゲート駆動電力を低減、主回路実装が容易、かつ高周波スイッチングが可能な高圧・大電流 IGBT モジュールの開発・実用化が進展した。JR 東海/東日本と国内企業4社は、図2の三相3レベル NPC インバータを新幹線電車の主電動機駆動用電力変換装置に採用することを目指して技術開発を推進した。その結果、JR 東海は1999年3月に営業運転を開始した700系から最新のN700S, JR 東日本はE2系（一部）とE4系から最新のE7系、すべての新幹線電車に図2の NPC インバータを採用している[10]。

3) 大規模太陽光発電への応用 2005年前後の1.2kV トレンチゲート IGBT の出現が契機となり、図4の NPC インバータの実用化が進展した。国内企業は世界に先駆けて、図4の NPC インバータを大規模太陽光発電の系統連系用インバータに採用した。この NPC インバータ技術は海外へ波及し、その市場規模は世界レベルで拡大している。

現在では、ほとんどの三相系統連系用コンバータ・インバータのシステム設計・制御には、システム構成や主回路構成とは関係なく、4節の pq 理論が直接的・間接的に応用されている。

6. 研究の社会貢献

半導体電力変換（パワーエレクトロニクス）の研究は、他の理工学分野と同様に、理論と実験に大別できる。赤木の理論研究は、4節の pq 理論[3]-[5]とサイクロコンバータとサイリスタ整流回路の高調波の等価性を数式証明した

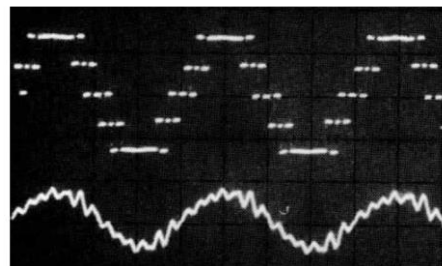


図3 三相誘導電動機の可変速運転
上：線間電圧波形 (200 V/div)
下：電流波形 (20 A/div, 5 ms/div)

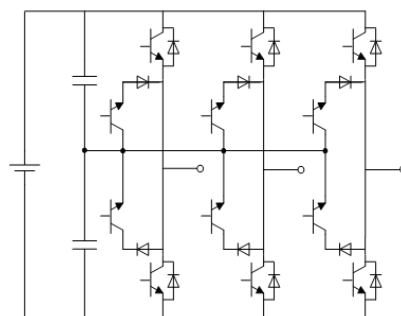


図4 図2から派生した三相
3レベル NPC インバータ

論文[12]である。世界的に見ても当該分野の理論論文は実験論文よりもはるかに少ない。 pq 理論の具体的な応用先は、5.3 節の鉄鋼圧延プラントや大規模太陽光発電の三相系統連系用コンバータ・インバータ、高調波抑制用アクティブフィルタ[7]、新幹線変電所用電圧品質改善装置[8]、電力系統用無効電力補償装置[9] などである。

赤木の実験研究は、5 節の三相 3 レベル NPC インバータ[10]、高周波誘導加熱装置[13]、高周波コロナ放電処理装置[14]、交流電動機駆動システムのノイズ抑制技術[15]、マルチレベルコンバータ[16]、双方向絶縁形 DC-DC コンバータ[17]、交流電動機駆動システムの実時間・実電力エミュレータ[18] など、多岐に亘っている。これらの研究は、当時最新のパワー半導体デバイスを使用した電力変換システムの主回路構成・実装・制御・応用を対象とし、企業の実用化・製品化に貢献した。具体的には、文献[13]では国内企業が加熱コイルと共振コンデンサの設計・製作を担当し、赤木研究室では高周波インバータと制御系の設計・製作と最終的な誘導加熱装置の実証試験を担当した。文献[15]では、赤木が実用的なノイズ抑制技術を考案し、東工大から単独で特許を出願・取得した。国内企業はこの抑制技術をカスタマイズして自社製品に組み込み、電磁障害の発生源であるコモンモードノイズを抑制した。結果として、交流電動機の軸電圧・軸端間電圧やベアリング電流などの付随した技術課題も同時に解決した。

特記事項としては、直近 10 年以内に出版された、パワーエレクトロニクスの和文・英文教科書の多くが pq 理論と三相 3 レベル NPC インバータを記述し、赤木の研究は大学院教育や社会人教育にも貢献している。

7. 参考文献

- [1] 宮入：「P. E. 30 年の回顧と展望（招待論文）」パワーエレクトロニクス研究会講演論文集，15 巻，pp. 1-6, 1989 年。
- [2] 赤木：「三相回路の瞬時無効電力理論（ pq 理論）：いかに誕生し、波及したか？（招待論文）」電気学会 電気技術史研究会 HEE-22-001, pp. 1-6, 2022 年 6 月。
- [3] H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, “Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits,” *IEEE International Power Electronics Conference (IPEC-Tokyo)*, pp. 1375-1386, March 1983.
- [4] H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, “Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components,” *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 20, no. 3, pp. 625-630, May 1984.
- [5] H. Akagi, E. H. Watanabe, and M. Aredes, “*Instantaneous power theory and applications to power conditioning*,” IEEE Press and Wiley, 379 pages for the first edition in 2007, and 450 pages for the second edition in 2017.
- [6] J. L. Willems, “A new interpretation of the Akagi-Nabae power components for non-sinusoidal three-phase situations,” *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 41, no. 4, pp. 523-527, Aug. 1992.
- [7] H. Akagi, “Active harmonic filters (invited paper),” *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 12, pp. 2128-2141, Dec. 2005.
- [8] A. Iizuka, M. Kishida, Y. Mochinaga, T. Uzuki, K. Hirakawa, F. Aoyama, and T. Masuyama, “Self-commutated static var generator at Shintakatsuki substation,” *IEEE IPEC-Yokohama*, pp. 609-614, April 1995.
- [9] 正城，天満，原田，松田，森島：「450MVA GCT-STATCOM による定態安定度向上技術及び系統過電圧抑制技術」三菱電機技報，87 巻 11 号，pp. 656-669, 2013 年 11 月。
- [10] A. Nabae, I. Takahashi, and H. Akagi, “A new neutral-point-clamped PWM inverter,” *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 17, no. 5, pp. 518-523, Sep. 1981.
- [11] 赤木，秋田，青山，田中，大熊，玉井：「3 レベル中性点クランプインバータの誕生と実用化（招待論文）」電気学会 電気技術史研究会 HEE-20-010, pp. 7-12, 2020 年 8 月
- [12] S. Miyairi, H. Akagi, T. Fukao, and M. Fujita, “Equivalence in harmonics between cycloconverters and bridge converters,” *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 15, no. 1, pp. 92-99, Jan 1979..
- [13] H. Akagi, T. Sawaei, and A. Nabae, “130-kHz 7.5-kW current-source inverters using static induction transistors for induction heating applications,” *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 3, no. 3, pp. 303-309, May 1988.
- [14] H. Fujita and H. Akagi, “Control and performance of a pulse-density-modulated series-resonant inverter for corona discharge processes,” *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 35, no. 3, pp. 621-627, May 1999.
- [15] H. Akagi and T. Doumoto, “An approach to eliminating high-frequency shaft voltage and ground leakage current from an inverter-driven motor,” *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 40, no. 4, pp. 1162-1169, July 2004.
- [16] H. Akagi, “Multilevel converters: Fundamental circuits and systems (invited paper),” *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 11, pp. 2048-2065, Nov. 2017.
- [17] R. Haneda and H. Akagi, “Design and performance of the 850-V 100-kW 16-kHz bidirectional isolated DC-DC converter using SiC-MOSFET/SBD H-bridge modules,” *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 35, no. 10, pp. 10013-10025, Oct. 2020.
- [18] K. Saito and H. Akagi, “A real-time real-power emulator for a medium-voltage high-speed electrical drives: Discussion on mechanical vibrations,” *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 57, no. 2, pp. 1482-1494, 2021.

(2022-05-26 赤木泰文－談)