

電力システム工学の講義準備



東京大学
大学院工学系研究科 電気系工学専攻
教授

熊田亜紀子 Akiko Kumada

筆者は、二年前より電力システム工学第一という、学部三年生に、電力システムの基礎を教える科目を、系統の先生とともに担当している。筆者は、本科目のハードウェアに関係する部分を担当しており、少し冗長になるが担当項目を列挙させてもらおうと下記の通りである。一章：緒論（日本のエネルギー事情、世界のエネルギー事情、電力事業の変遷、電力輸送の特徴、エネルギー政策と技術開発）、二章：送電系統の基礎（送電方式、直流と交流、50Hzと60Hz、送電電圧、系統構成、三相交流）、三章：送変電設備（架空線、地中線、変電機器、開閉器）、四章：系統に発生する過電圧とその保護（過電圧の種類、避雷器、絶縁協調）、五章：直流送電。

10年前、20年前と変わらず懐かしい単語が並び、昔と変わらない大学の講義がなされていると思われる方も多いかもしれない。二年前に前任者からキーワードともろもろの資料を引き継いだときは、実は、筆者自身少なからずそう思ったのである。電力機器の寿命は30年～50年であるし、建設、維持に要する投資額も大きい社会インフラであるし、そうそうすぐ変わるものでもなく、また学部生を対象とした基礎に関係する講義なのだから、昔から変わらないのだろう、と。しかしその第一印象は、実際に講義ノートを一から見直し、新たに作り直す作業を開始したと同時に大きく覆された。

まず、第一章に関しては、シェールガスの発見、311、中国の経済成長と鈍化と、この10年、15年で社会のエネルギー事情が大きく変化している。再生可能エネルギー源の導入拡大を目指したFIT法も気づけば“卒FIT”である。第二章の系統に関しても、再生可能エネルギー源の大量導入に伴い、グリッドの考え方が大きく変わりつつある。もはや、「発電所で発電した電気を一度高電圧にして長距離を効率良く送電し、そして変電所で電圧を落として最後は柱上変圧器で100Vにしてコンセントまで来ています」と単純化した話だけではないことは、新聞の1面を見ていれば、専門外の人にもわかる。環境適合性の高い電源の開発に伴い、分散電源を有した受配電システム、エネルギー貯蔵技術、洋上風力システムなどへの直流送変電、データセンターへの直流給電、そして自励式HVDC技術を用いた多端子直流送電技術の開発と、電力輸

送・貯蔵技術の革新・開発がすすんでいる。このように電力システムの目指す方向性に大転換が発生すると、三章以降の、ネットワークを構成するハードウェア技術も大きな変化が生まれ、そして日進月歩の勢いで新しい技術が開発されている。例えば、直流遮断技術の全世界のメーカーをあげての開発競争をうけ、毎年、講義のたびに、どの電圧レベルまでどのタイプの機種が適用できるようになったか、確認に追われている。

このようにわずか10年、15年前の教科書が（言葉は悪いが）古臭くなってしまい、新しい資料をあちこちからかき集めて講義の準備をする事態というのは、電力分野を教えている教員にとってそうそうなかったのではないだろうか。

さて、電力システムの目指す方向性にこのような大転換が生じると、当然、絶縁技術、そのベースとなる高電圧現象の理解を目的とした研究開発の方向性に大きな影響を与えることとなる。展開先が明確なニーズ志向的な研究が進歩するとともに、計算機技術や、光計測技術など周辺技術の進歩により、「シーズ」研究開発が推進されることもある。今後も、ニーズとシーズ両面から、高電圧現象に関する研究が進んでいくと考えている。

このシーズ技術として、筆者の専門である、電界計測技術について近年の流れを紹介したい。放電が生じている系や、材料中に空間電荷が蓄積した系など、ポアソン場の電界分布の把握には測定が必要不可欠である。電界計測には、古くから各種の電氣的測定法が用いられてきたが、80年代以降からは、安定なレーザー光源、SNのよい光検出素子、良質な光学部品が入手できるようになったことを受けて、光学的測定法も大きく進歩した。物質に外部から電界が加わると物質の分極が変わり、非線形光学効果を示すようになる。例えば、Eが小さいときPはEに比例するが、Eの増加とともにEの二乗や三乗に比例する成分を含むようになる。これらの項が二次の非線形光学効果（ポッケルス効果等）、三次の非線形光学効果（光カー効果、電界誘起二次高調波発生DC-SHG等）を誘発する。

これら非線形光学効果をベースに、種々の電界計測法が開発されてきた。光を利用した電界計測は、電磁無誘導性、応答の速さ、そして非侵襲性という点で優れた特長を持つ。著者は、90年代より30年近くポッケルスセンサの開発に関わり、その高精度化、高電圧化、沿面放電測定への展開などを行ってきた。ポッケルスセンサに関しては、汎用性の高い市販品が入手しづらい欠点があったが、2010年代に入りフランスのベンチャー会社が1mm程度の分解能を持った2方向ベクトルセンサの市販品を売り出しており、放電応用分野などで活発に導入されるようになってきている。IECではSC86CにおいてIEC61757シリーズとして、近年光ファイバセンサの規格化が進められており、ポッケルス電界センサの規格化も進みつつある。

理想的な電界計測法は、「その場を乱すことなく、高い時間・空間分解能で、感度よく測定できること」が求められる。例えば、絶縁媒体そのものの非線形効果を利用すれば、理想的な「非侵襲・非接触測定」が行える。筆者も2000年頃より、気体のカー効果を利用した電界測定に取り組み、光学的変調手法を導入することで測定感度を3-4桁改善して非侵襲・非接触電界測定を実現させている。

カー効果は、三次の非線形感受率 χ^3 、印加電界の二乗、光の電界の積に比例した分極によるものであるが、物質の χ^3 はたいてい極めて小さな値である。そのため、気体のカー効果を利用した測定は、感度の低さから、時間分解能や空間分解能を犠牲にせざるをえなかった。そのような背景下、2017年にプリンストン大の研究グループより電界誘起第二高調波発生（E-FISHG, DC-SHGと言われる）を利用した電界計測手法が報告され、プラズマ応用分野でまたたく間にヨーロッパの研究グループを中心に追試、拡張実験が行われるなど大きな反響を起している。この手法は、カー効果同様、媒質（気体分子）の分極の三次の非線形感受率 χ^3 を利用したものであるが、 χ^3 、光の電界の2乗、印加電界の1乗の積に比例した分極を利用する。そのため、このDC-SHG法は

瞬間的な光電界を極めて強くすることで χ^3 は小さくとも大きな分極の非線形項（すなわち高感度出力）が期待できるという手法であり、 $\sim 1\text{mJ}$ 程度の出力のフェムト秒レーザを打ち込むことで、高感度（ 200V/cm 程度）のラプラス場の計測に成功している。空間分解能もビーム断面方向には程十 μm 程度、ビーム進展方向にも数 cm 程度が達成されている。筆者の研究グループもこのDC-SHG法に取り組み、光進行方向の分解能向上とその限界の検証を行っている。フェムト秒レーザの価格

が下がれば、より手軽に、ラプラス場、ポアソン場への適用が期待できる。

電界計測技術という「シーズ技術」にも、このように、何十年ぶりの期待の新星が現れている。新しい電力システムを構築していくなかで、このようなシーズ技術が社会のあちこちで活躍していくのは、シーズ技術研究に携わる大学人としても研究者冥利につきる。毎年のように、講義資料のアップデートに追われるのを恨めしくも思うのは些末なことであろう。