

川越キャンパス内エネルギー利用に関する指標化および周辺地域向け移動電源設備の開発

平瀬祐子^{1*} 蒲生西谷美香² 吉本智巳¹ 加藤正平³

Indexing of energy use on Kawagoe campus and development of mobile power supply equipment for surrounding areas

Yuko Hirase^{1*} Mikka Nishitani-Gamo² Tomomi Yoshimoto¹ Shohei Kato³

Abstract: In the global energy situation, daily efforts for energy saving (sustainability) and emergency resilience towards natural disasters are required simultaneously. Because the Kawagoe Campus is a designated emergency evacuation site in Kawagoe City and in order to supply energy in a disaster as a regional base, in this study, the use of electrical energy on campus will be investigated and mobile power supply equipment will be built. As COVID-19 restricted access to the campus, this paper reports on the results of the campus grid survey and the progress in the development of the inverter for a mobile power supply.

1. はじめに

地球温暖化を背景に、日常生活における電力利用に障害が発生する事例が多発している。川越キャンパスは川越市の緊急避難場所に指定されており、地域の拠点として、平時においても災害時においても、安心・安全なエネルギーを地域へ供給する使命がある。そこで本研究において、キャンパス内の電気エネルギーの利用状況を指標化し、将来的にキャンパス内外で利用可能な移動式電力供給設備を構築することを目指す。2020年度はCOVID-19の影響でキャンパス入構が制限され、電力の平常利用が無かったため、本紙では、工技研プロジェクトの一環として、低圧電気取扱業務特別教育を受講した模様、キャンパス内電気設備点検への同行と停電事故調査を行った結果、および移動電源用電力変換装置の開発における進捗状況について報告する。

2. 低圧電気取扱業務特別教育

2.1 低圧電気取扱業務特別教育とは

低圧電気取扱業務特別教育は、電気を原因とした災害を防止するための特別教育である¹⁾。低圧電気取扱業務特別教育に関する講習会は、各地域で実施されており、内容は電気に関する基礎知識から始まり、電気災害を防

ぎ被害を受けないための安全教育といったカリキュラムになっている。筆者らは、電気設備や電力変換装置を扱う本研究を実施する学生の安全を考慮し、安全衛生マネジメント協会によって大宮ソニックシティにて開催された2020年6月26日の低圧電気取扱業務特別教育の講習会に、学生8名と教員1名(筆者)で参加した。

2.2 受講内容

低圧電気取扱業務特別教育は、学科(7時間)と実技(開閉器の操作の業務のみを行なう者の場合1時間以上)で構成されることが、安全衛生特別教育規程で決められている。学科は、①低圧の電気に関する基礎知識(1時間)、②低圧の電気設備に関する基礎知識(2時間)、③低圧用の安全作業に関する基礎知識(1時間)、④低圧の活線作業及び活線近接作業の方法(2時間)、⑤関係法令(1時間)で構成され、講習会は学科のみの1日講習であった。COVID-19の影響で、東京などの多くの講習会が中止や延期となる中で大宮の講習会が開催されたため、多数の講習者で教室が満室であったことには多少の不安を感じたが、主催者・参加者それぞれが新型コロナウイルス感染防止に十分注意することで、問題なく学科講習会の受講を修了した。

¹ 東洋大学 理工学部 電気電子情報工学科
Department of Electrical, Electronic and Communications
Engineering, Faculty of Science and Engineering

² 東洋大学 理工学部 応用化学科
Department of Applied Chemistry, Faculty of Science and
Engineering

³ 東洋大学 工業技術研究所 客員研究員
Visiting Researcher, Research Institute of Industrial
Technology, Toyo University

*Corresponding Author: hirase028@toyo.jp

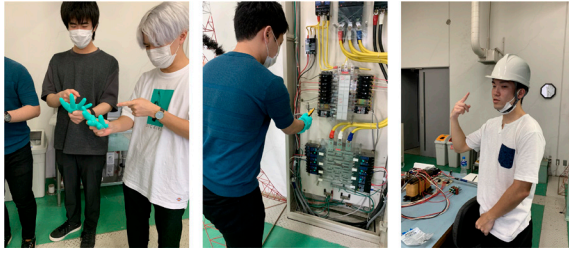


図 1. 低圧電気取扱業務特別教育実技実習の様子。



図 2. 低圧電気取扱業務特別教育修了証。

実技は、低圧の活線作業及び活線近接作業の方法について参加者の所属において教育を行う。通常は、協会から配布された実技教育マニュアルや配信動画に従って講習会の前に行い、講習会時にその証明を提出することで、特別教育終了証を当日受け取ることができる。しかし筆者の場合、学生のキャンパス入構制限により、2020年度研究室附属学生と対面する機会が本講習会で初めてという状況であったため、実技教育を学科講習会の終了後に学内において行い（図 1）、その証明を提出することにより、特別教育終了証を郵送で受け取った（図 2）。

3. 川越キャンパス配電網

3.1 電気設備点検作業への同行

川越キャンパスでは、夏季休暇中と冬季休暇中の 8 月と 12 月に電気設備点検を行うが、2020 年は、5 月 1 日に発生したキャンパス内停電事故の調査を兼ねる目的で、8 月の電気設備点検が 7 月に前倒しされた。筆者らは、電力を効率的に活用できるエネルギーマネジメントシステム（EMS）の構築を目指すため、川越キャンパス内における配電網調査が必要と考え、上記の電気設備点検作業に同行することとした。

3.2 キャンパス内停電事故

川越キャンパスは小堤変電所で高圧受電後、高圧第一フィーダと高圧第二フィーダを持つ。図 3 は川越キャン



図 3. 川越キャンパスマップと配電線図。

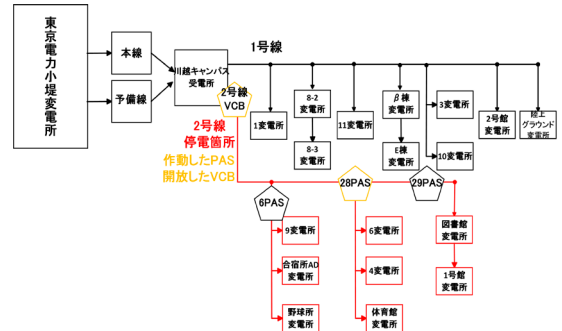


図 4. 川越キャンパスの配電網簡易接続図。



図 5. 小動物侵入形跡と感電した小動物の死骸。

ンパスマップと配電線の関係を示した図で、図 4 は配電網の簡易接続図である。停電は、第一フィーダのおよそ半分のエリアで発生しており、その経路を図 3 中に赤い太い矢印で、図 4 中に赤線で示した。電気設備点検作業では、第 6 変電所キュービクルにおいて小動物の侵入形跡や死骸が発見された（図 5）。当初はこれが停電の原因と推測されたが、高圧線が停電しているのに関わらず、小動物の死骸が低圧線間で発見されたこと、28 気中負荷開閉器（PAS）以外の 6PAS 以下や 29PAS 以下も停電したことなどから、停電事故が大規模に及んだことについて精査する必要があると判断した。

余談であるが、小動物の死骸は低圧線間においてロースト状態で発見されており、高圧線接触であれば即死であったと予想するが、特別教育を受けた低圧電気の危険性を改めて再認識することとなった。

4. キャンパス内停電シミュレーション

4.1 停電事故のシナリオ

停電事故状況を再現するため、模擬シミュレーションを実施した。シミュレーションには、DIGSILENT 社製 PowerFactory²⁾を使用した。シミュレーション回路を図 6 に示す。

一般財団法人関東電気保安協会が作成した試験成績表、及び東洋大学川越キャンパスの設備担当の方々が作成した川越キャンパスの送配電網や停電箇所、遮断器の開閉時間等の資料を基に、高圧第二フィーダ (2 号線) 真空遮断器 (VCB) と 28PAS の開放時間に着目して、表 1 のような停電事故シミュレーションのシナリオを考えた。

ここでは第 6 変電所高圧側で事故が発生したと仮定し、この中で発生確率が高いとされる一相地絡事故(④)と、過電流量が大きい三相短絡事故(③)に着目して、2 号線 VCB の開放時間が 28PAS と同じ 0.3s の場合と、0.5s に修正した場合との結果の③の比較を行った。

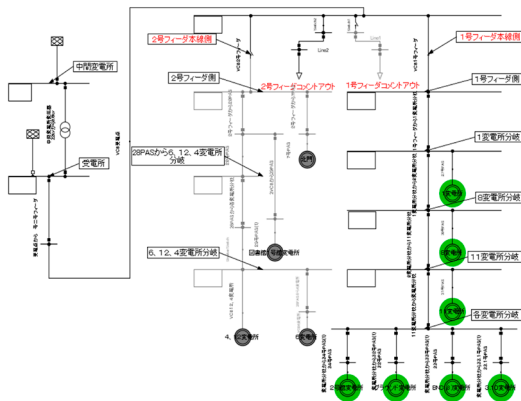


図 6. Power Factory によるシミュレーション回路図。

表 1 停電事故シミュレーションのシナリオ

事故の場所	事故の内容	遮断器の開閉時間
6変電所高圧側	①a相断線事故	VCB=0.3s 28PAS=0.3s
	②a,b相短絡事故	VCB=0.3s 28PAS=0.3s
	③三相短絡事故	VCB=0.3s → 0.5s 28PAS=0.3s
	④a相の地絡事故	VCB=0.3s 28PAS=0.3s
	⑤a,b相の地絡事故	VCB=0.3s 28PAS=0.3s

4.2 停電事故のシミュレーション³⁾⁻⁵⁾

第 6 変電所高圧側で地絡事故が発生した場合のシミュレーション結果を図 7 に、三相短絡事故が発生した場合で、2 号線 VCB の遮断時間が 0.3 s (事故発生時の設定時間) のシミュレーション結果を図 8 に、0.5s に修正した場合の結果を図 9 に示す。図 10 は図 9(b)の事故発生直前の、図 11 は図 9(c)の事故発生直後の拡大図である。電気設備点検により、絶縁低下による過電流などが疑われたものの、停電発生 of 直接的な原因は明らかにならなかった。しかし、図 8 および図 9～図 11 を比較すると、28PAS の開放のみで過電流を阻止できることが分かる。すなわち、上位にある 2 号線 VCB が下位にある柱上用保護継電器装置 (SOG) や PAS と同時またはそれらよりも早く動作したことが、停電事故が大規模に至った原因であり、2 号線 VCB の開放時間が正しく (SOG や PAS の時限より長く) 設定されていれば、停電は 28PAS 以下だけに限定されたと推定される。ただし、PAS 開放から VCB 開放までの時間は三相不平衡電流が流れる (図 11) ため、PAS に設定される過電流閾値には留意する必要がある。

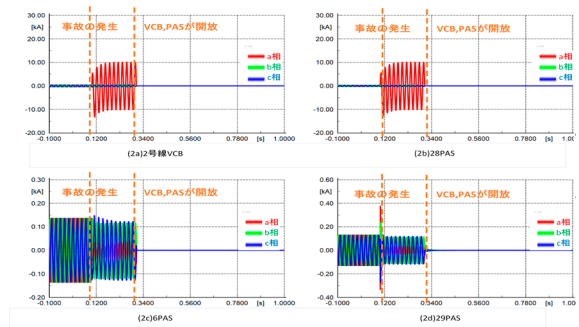


図 7. 地絡(a 相)事故発生時の各所電流値。

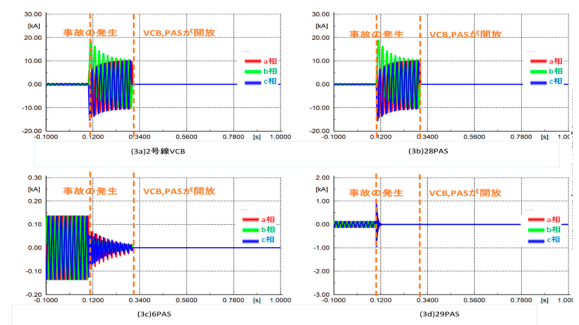


図 8. 三相短絡事故発生時の各所電流値 (VCB 開放時間は元の 0.3s)。

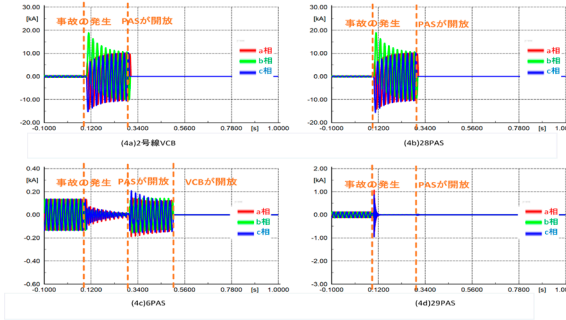


図 9. 三相短絡事故発生時の各所電流値 (VCB 開放時間を 0.5s に修正時).

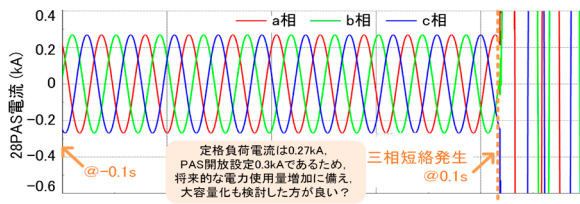


図 10. 図 9(b) [-0.1s, 0.1s]付近の拡大図.

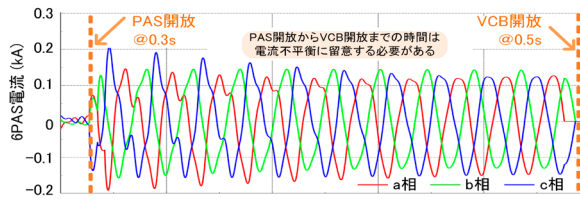


図 11. 図 9(c) [0.3s, 0.5s]付近の拡大図.

5. 移動電源用電力変換装置と EMS の開発

5.1 電力変換装置の開発

川越キャンパスβ棟などには、重要負荷向けの非常用ディーゼルエンジン発電 (DEG) が準備されている。しかし、商用電源が停電してからこれら非常用発電機の稼働までは、負荷への給電が瞬断する時間が存在する。また、これを補償する、無停電電源装置 (UPS) も、商用系統との連系運転や自律的な並列運転が難しいという問題が存在している。β棟は高圧第二フィーダの経路に位置し、前節記載の停電事故時には停電しなかったが、将来同様の事故が発生する可能性を考慮し、DEGとも商用電源とも並列運転可能で、かつ、UPS 利用時よりも蓄電池容量を削減可能な VSG(仮想同期発電機) 制御を搭載した電力変換装置 (図 12、定格容量 5 kW、単相 100 V 連系) とその EMS を現在製作中である。imperix 社製パワーモジュール PEB8024 (SiC MOSFET) と開発用コントローラ B-Box RCP を使用

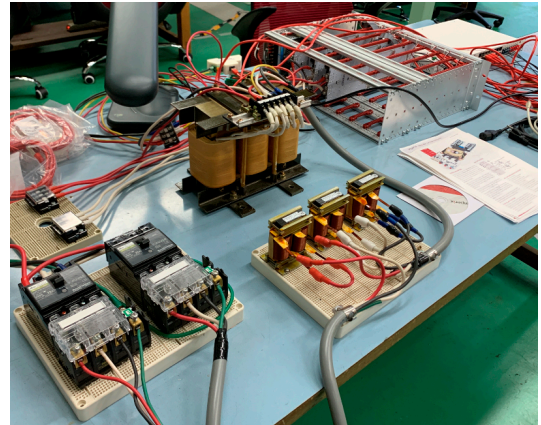


図 12. 製作中の VSG 制御搭載電力変換装置.

している。B-Box RCP は C/C++コーディングだけでなく、ACG SDK と呼ばれる MathWorks 自動プログラムコード生成ツール (3rd パーティ) を組み合わせることで、複雑な制御アルゴリズムを MATLAB/Simulink ベースで容易に設計することが可能なツールである。2020 年度 3 月時点で電力変換装置の稼働には至らなかったが、平時および災害時の双方で活躍する移動電源設備への搭載を目指して、工技研プロジェクト終了後もこれらの構築を継続している。

5.2 EMS の中核となる仮想同期発電機 (VSG) 制御

提案する EMS の中核となる VSG 制御の特徴について、シミュレーション結果を用いて紹介する。図 13 に VSG 制御のブロック図を示す。本研究では、その制御構成が比較的簡単で設定パラメータ数が少ないカワサキ形 VSG 制御^{6),7)}を採用した。VSG 制御とは、直流エネルギー (蓄電池エネルギー) を利用して、同期発電機と同様の慣性特性を電力変換装置に仮想的に具備させる制御手法である。下位層への電流指令値が同期発電機方程式のアルゴリズムから算出され、P (有効電力) - F (周波数) 制御部では動揺方程式とガバナフリー制御を、Q (無効電力) - V (電圧) 制御部では無効電力の

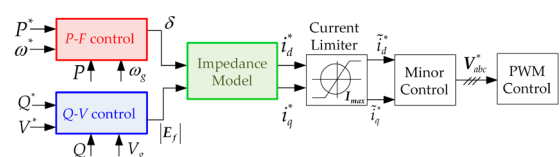


図 13. VSG 制御ブロック図.

垂下特性と自動電圧調整 (AVR) を実現する。図 14 に VSG シミュレーションに用いた系統接続図を、表 2 にシミュレーションのシナリオを、図 15 にシミュレーション結果を示す。電力変換装置の直流側には、蓄電池を模した回生機能付き直流電源を接続しており、電力変換装置と商用系統の間には、1 pu (5 kW) の有効電力負荷が接続されている。シミュレーション開始 9 s で停電発生を模して負荷と商用系統の間のブレーカが開放されるが、それまで (平時) は電力変換装置が商用系統からの給電を補助 (売電) し、停電発生以降 (災害時) は電力変換装置のみによる負荷給電に無瞬断で遷移することが判る。制御ロジックの切り替え不要の無瞬断遷移は仮想慣性特性によるものであり、平時および災害時の双方で活躍する移動電源設備への搭載が期待される。

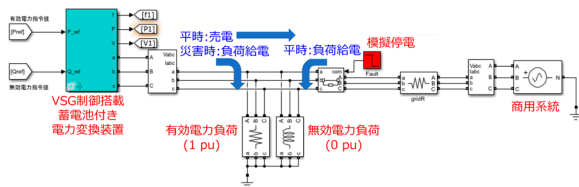


図 14. シミュレーション用系統接続図

表 2 VSG シミュレーションのシナリオ

時間	説明
0~2 (s)	PLLによる系統周波数・位相推定
2 (s)	電力変換装置電源オン
2~3 (s)	VSG制御整定待ち時間
3 (s)	有効電力指令変更 (0 pu → 1 pu)
4.5 (s)	無効電力指令変更 (0 pu → 1 pu)
6 (s)	有効電力指令変更 (1 pu → 0 pu)
7.5 (s)	無効電力指令変更 (1 pu → 0 pu)
9 (s)	停電事故模擬

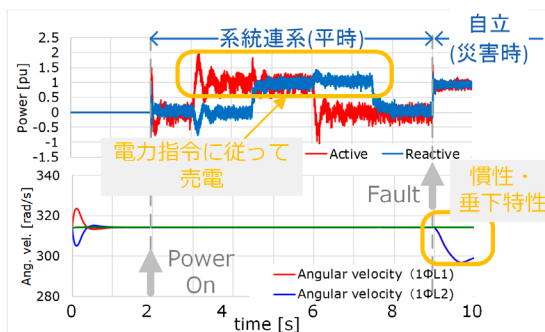


図 15. VSG の無瞬断給電シミュレーション。

6. まとめ

2020 年度工技研プロジェクトの一環として、低圧電気取扱業務特別教育の受講内容、キャンパス内電気設備点検と停電事故調査の結果、および移動電源用電力変換装置開発の進捗状況について報告した。特別教育では低圧電気取扱の危険性について学生に周知することができた。電気設備点検では、普段目にするののないキャンパス配電網への理解が深まったとともに、停電事故の検証によって、2号線 VCB と 6 変電所 SOG、PAS との保護協調不足が停電が大規模に至った原因と推定することができた。移動電源用電力変換装置の開発は現在進行中であり、VSG 制御に関するシミュレーションを行いながら EMS の検討を進める予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、電気電子情報工学専攻 パワーエレクトロニックシステム研究室の松浦尚哉君やその他の学生の皆さまのご協力を頂きました。感謝の意を表します。

参考文献

- 「低圧電気取扱業務特別教育 講習会のご案内」, 安全衛生マネジメント協会,
https://www.aemk.or.jp/kyoiku/shubetsu_teiatu.html
(last accessed: 2021/09/06)
- DIgSILENT GmbH – Power System Solutions,
<https://www.youtube.com/channel/UCYeemWgz7t69zcdr9ruzFSQ> (last accessed: 2021/09/06)
- 川本 浩彦, 「図説 6kV 高圧受電設備の保護協調 Q&A—電気現象から見た地絡・短絡の解説」, エネルギーフォーラム, 改訂新版, 2008.
- 「高圧受電設備等設計・施工要領」, オーム社, 改訂 2 版, 2012.
- 田沼 和夫, 「大写真 高圧受電設備: 施設標準と構成機材の基本解説」, オーム社, 2017.
- Y. Hirase, K. Sugimoto, K. Sakimoto, and T. Ise, “Analysis of resonance in microgrids and effects of system frequency stabilization using a virtual synchronous generator,” IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol.4, no.4, pp.1287–1298, 2016.
- Y. Hirase, K. Abe, K. Sugimoto, K. Sakimoto, H. Bevrani, and T. Ise, “A novel control approach for virtual synchronous generators to suppress frequency and voltage fluctuations in microgrids,” Applied Energy, vol.210, pp.699–710, 2018.